



Juha Kantola

## **NOPEAT LÄMPÖKÄSITTELYT ERIKOISTERÄSTEN OMINAISUUKSIEN PAIKALLISESSA RÄÄTÄLÖINNISSÄ**

# **NOPEAT LÄMPÖKÄSITTELYT ERIKOISTERÄSTEN OMINAISUUKSIEN PAIKALLISESSA RÄÄTÄLÖINNISSÄ**

Juha Kantola  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotantotalous

---

Tekijä: Juha Kantola  
Opinnäytetyön nimi: Nopeat lämpökäsittelyt erikoisterästen ominaisuuksien paikallisessa räätälöinnissä  
Työn ohjaaja: Esa Törmälä  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015  
Sivumäärä: 54 + 0 liitettä

---

Opinnäytetyössä käytiin läpi Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tekemiä tutkimuksia ja tutkimusraportteja. Työssä tutkittiin erikoisterästen lämpökäsittelyä, särmäystä ja lämpökäsittelymenetelmien toimivuutta. Erikoisterästen särmättävyyteen voidaan vaikuttaa positiivisesti paikallisilla lämpökäsittelyillä.

Terästen käyttäjien ja valmistajien kasvaneet vaatimukset ovat johtaneet erikoisterästen, kuten kulutusteräksen ja ultralujan rakenneteräksen kehittämiseen. Terästen korkea kovuus aiheuttaa ongelmia terästen muovauksessa. Särmäys on yleinen teräksen muovausmenetelmä. Terästen särmättävyyttä on mahdollista parantaa useilla erilaisilla lämpökäsittelymenetelmillä. Yleisimpiä ovat laserlämpökäsittely ja induktiokuumennus. Ennen särmäystä särmän kohdalla olevat naarmut ja leikkausreuna tulee hioa. Lämpökäsittelyn avulla erikoisteräkset voidaan särmätä huomattavasti pienemmillä taivutussäteillä kuin valmistajien ilmoittamat minimiarvot.

Työssä läpikäydään Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän ULLA-projektin tuloksia. Taulukoihin on kerätty Optim 960 QC, Optim 1100 QC, Raex 500 ja Miilux 500 -terästen pienimmät taivutusarvot ja toimivat laserkäsittelyparametrit. Teräkset voitiin särmätä lämpökäsittelyiden avulla huomattavasti pienemmillä säteillä kuin valmistajan ilmoittamat minimiarvot. Taivutussäteitä saatiin pienennettyä laserlämpökäsittelyiden avulla 34 - 68 % perusaineisiin verrattuna. Lopuksi on käsitelty paikallisten lämpökäsittelyiden etuja, haittoja ja kustannustehokkuutta. ULLA-projektissa käytetty laserlämpökäsittely on huomattavasti kalliimpi ja huonomman hyötysuhteen omaava menetelmä kuin induktio. Induktion hyötysuhde on noin 80 - 90 % ja laserin noin 20 %. Kustannuksiltaan laser maksaa kilowatilta noin 40 000 € ja induktio 1 000 €.

---

Asiasanat: teräs, lämpökäsittely, särmäys

## ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmälle. Työ liittyy FMT-tutkimusryhmän vetämään Suomen hitsausteknisen yhdistyksen Materiaali- ja tuotantofoorumin toimintaan. Työn tilaajan yhdyshenkilönä toimi tutkimusjohtaja Kari Mäntyjärvi ja työn ohjaajana Oulun ammattikorkeakoulun lehtori Esa Törmälä.

Tahdon kiittää Kari Mäntyjärveä mahdollisuudesta opinnäytetyöhön ja hyvästä tuesta työn aikana. Kiitos myös ohjaavalle opettajalle Esa Törmälälle.

Oulussa 29.4.2015

Juha Kantola

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 ERIKOISTERÄKSET	7
1.1 Kulutusteräs	8
1.2 Rakenneteräs	9
2 MUOVATTAVUUS JA MUOVAUS	10
2.1 Muovattavuuden määrittäminen särmäyksessä	10
2.2 Taivutus	10
2.2.1 Pintavaurioiden vaikutus teräksen taivutettavuuteen	11
2.2.2 Teräksen vaiheittainen taivutus	19
3 TERÄKSEN NOPEAT LÄMPÖKÄSITTELYMENETELMÄT	30
3.1 Induktiokuumennus	30
3.2 Laserlämpökäsittely	31
4 ERIKOISTERÄSTEN LASERAVUSTEINEN TAIVUTUS	32
4.1 Optim 960 QC 4 mm	34
4.2 Optim 1100 QC 4 mm	37
4.3 Optim 960 QC 6 mm	39
4.4 Optim 1100 QC 6 mm	41
4.5 Miilux 500 6 mm	42
4.6 Raex 500 6 mm	45
4.7 Miilux 500 10 mm	47
4.8 Raex 500 10 mm	49
5 TERÄKSEN PAIKALLISEN LÄMPÖKÄSITTELYN EDUT, HAITAT JA KUSTANNUSTEHOKKUUS	52
5.1 Taiteen kovuus	52
5.2 Paikallisen lämpökäsittelyn hyötysuhde ja kustannukset	53
6 YHTEENVETO	54
LÄHTEET	57

## JOHDANTO

Työssä esitellään paikallisten lämpökäsittelyiden tekniikkaa ja mahdollisuuksia erikoisterästen särmättävyyden parantamisessa. Työssä perehdytään ultralujien rakenneterästen ja kulutusterästen ominaisuuksien paikalliseen räätälöintiin lyhyillä lämpökäsittelyillä. Työssä läpikäydään Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tutkimusraportteja ja tutkimusjulkaisuja sekä haastatellaan aihealueen kotimaisia asiantuntijoita.

Työn tavoitteina on esitellä nopeiden lämpökäsittelyiden eri menetelmiä ja selvittää lämpökäsittelyiden mahdollisuuksia eri teräslajeissa. Tutkimusraporteista kootaan toimivat taivutusarvot eri teräksille. Lisäksi tarkastellaan terästen paikallisten lämpökäsittelyiden etuja, haittoja ja kustannustehokkuutta.

# 1 ERIKOISTERÄKSET

Käyttäjien ja valmistajien vaatimuksien kasvu on johtanut erikoisterästen kehittämiseen. Erikoisteräksiä ovat ultralujat rakenneteräket, kulutusteräket ja muokkauslujitetut teräket. Tavoitteena on saavuttaa korkeampi lujuus ja parempi kulumisen kesto, jotta teräksen omapainoa saataisiin vähennettyä ja käyttöikää pidennettyä. (1, s. 6.)

Erikoisterästen käyttökohteita ovat esimerkiksi nostolaitteet ja puomistot. Niitä käytetään myös nykyaikaisissa kantavissa rakenteissa sekä liikkuvassa kalustossa, kuten suurissa maansiirtokoneissa ja tavaraliikenteessä. Suurimpia erikoisterästen käyttäjiä ovat raskas teollisuus sekä kuljetus- ja nostolaittevalmistajat. Erikoisteräksiä käytetään myös autoteollisuudessa korvaamalla alemman lujuusluokan teräksiä lujemmilla teräslaaduilla. (1, s. 6.)

Autoteollisuus on johtavassa asemassa ohuiden ultralujien terästen käytössä. Raskaassa ajoneuvoteollisuudessa runko- ja kuormankuljetusrakenteista tehdään kevyempiä, jolloin kokonaismassa ei kasva, mutta kantavuus paranee (2, s. 17). Henkilöautoissa pyritään entistä parempaan turvallisuuteen. Lisäksi autoissa oleville kulutusosille halutaan entistä pidempää käyttöikää tehden niistä samalla kevyempiä. (1, s. 6.)

Erikoisterästen käytön päämääränä on löytää vaihtoehtoinen ja kestävä kehityksen mukainen ratkaisu korvaamaan perinteiset teräket. Tavoitteena on löytää optimaalisempi rakennevaihtoehto perinteisiin teräksiin nähden. Käyttämällä lujempia ja kevyempiä teräksiä päästään parempaan hyötykuormasuhteeseen ja edullisempaan suorituskykyyn. (1, s. 6.)

Erikoisteräksiä valmistetaan seosaineiden, valssauksen ja lämpökäsittelyiden avulla. Näiden avulla voidaan vaikuttaa teräksen mikrorakenteeseen ja sen myötä teräksen ominaisuuksiin. Raekoon pienentäminen nostaa teräksen iskusitkeyttä ja lujuutta. Tällä hetkellä markkinoilla on tarjolla SSAB:n toimesta termomekaanisesti valssattuja (M, thermomechanically rolled) ja nuorrutettuja

(Q, quenched and tempered) ultralujia teräksiä (3, s. 12). Kulutusteräket ovat karkaistuja.

Termomekaanisella valssauksella, eli kontrolloidulla kuumavalssauksella teräkselle saavutetaan parempi sitkeys, korkeampi lujuus ja pienempi raekoko. Valssaus suoritetaan säätelämällä valssauksen lämpötilaa ja muokkausta. Valssauksen jälkeen teräs jäähdytetään nopeasti vesisuihkun avulla. Termomekaaninen valssaus mahdollistaa vähäisemmän seosaineiden käytön. Seosaineiden vähäinen määrä ja hiilen määrän väheneminen mahdollistavat paremman hitsattavuuden nuorrutettuihin seostettuihin teräksiin verrattuna. Nuorrutetuille teräksille suoritetaan normalisointi heti sammutuksen jälkeen. (1, s. 12.)

Normalisoinnissa teräs kuumennetaan nopeasti austeniittiseksi ja annetaan jäähtyä hitaasti. Kun teräs on jäähtynyt, sille suoritetaan päästö noin 580 - 680 °C:n lämpötilassa. Nuorrutetut teräket ovat seostettuja teräksiä ja niillä on korkea lujuus. Huonona puolena seostuksessa on vaikeampi hitsattavuus ja muovattavuus termomekaanisesti valssattuihin seostamattomiin tai vähäseosteisiin teräksiin verrattuna. (1, s. 12, 13; 4, s. 38, 39.)

### **1.1 Kulutusteräs**

Kulutusteräs eli AR-teräs on terästä, joka sopii erinomaisesti maansiirtokoneisiin ja muihin kulumisen kestoja vaativiin kohteisiin. AR-teräket luokitellaan kovuuden perusteella tasoille 300 - 700 HBW, mutta niiden myötöraja on myös korkea (1, s. 6). Kulutusterästen suuri kovuus saadaan aikaan karkaisulla ja mikrorakenne on tällä menetelmällä martensiittinen.

Kulutusterästen ominaispiirre on korkea pintakovuus. Kehityksen myötä kulutusterästen ominaisuuksiin on yhdistynyt myös korkea lujuus ja sitkeys (1, s. 6). Suuren kovuuden vuoksi leikkaaminen on hankalaa ja mitä suurempi on teräksen kovuus, sitä vaikeampaa on myös teräksen särmääminen. Kulutusterästen muovattavuus on rakenneteräksiin verrattuna huomattavasti huonompi ja jotkut valmistajat eivät suosittele lujimpia teräksiään särmättäväksi ollenkaan. Kulutusteräkselle on ominaista, että särmättäessä murtuma syntyy äkillisesti. Tässä



työssä tarkastellaan Raex 500 ja Miilux 500 -kulutusterästen lämpökäsittelyä ja särmäystä.

## **1.2 Rakenneteräs**

Ultralujat eli UHS-teräkset ovat lujia ja sitkeitä rakenneteräksiä. UHS-teräksillä on korkea myötö-/murtolujuussuhde (1, s. 6). Ultralujia rakenneteräksiä käytetään koneenrakennuksessa, teräsrakenteissa sekä nosto- ja siirtolaitteissa. Mikrorakenne koostuu esimerkiksi bainiitin ja martensiitin yhdistelmästä, jolloin puhutaan kaksi- tai monifaasiteräksestä. Ultralujat teräkset valmistetaan kuuma-valssaamalla ja kovuus saavutetaan valssauksen jälkeisellä kontrolloidulla jäähdytyksellä. (2, s. 18.)

Ultralujilla rakenneteräksillä on hyvät muovattavuus- ja leikkausominaisuudet. Rakenneteräksiä särmätessä teräs vastustaa murtumista huomattavasti paremmin kuin kulutusteräs. Rakenneteräksillä pinnan vikaantuminen voidaan havaita pinnan karheutumisena ja siitä eteenpäin syntyneiden säröjen hiljalleen aukeamisena. Tässä työssä tarkastellaan Optim 960 QC ja Optim 1 100 QC -rakenneterästen lämpökäsittelyä ja särmäystä.

## 2 MUOVATTAVUUS JA MUOVAUS

Muovauksen aikana aihioon kohdistetaan materiaalin myötörajaa suurempi jännitys, jolloin aihiossa tapahtuu plastinen eli pysyvä muodonmuutos. Materiaalin ominaisuuksilla on suuri vaikutus muovauksen onnistumiseen. (2, s. 25.)

Erikoisterästen muovaus asettaa korkeita vaatimuksia materiaalin käsittelylle ja työstölle. Materiaalin väärinkäyttö voi johtaa arvaamattomiin vikoihin dynaamisen kuormituksen alla tai muokkausprosessin aikana. Pintaa venyttävässä kuormituksessa erityisesti pinnanlaadun virheet voivat aiheuttaa mittavia vikoja. Särämäyskohdissa esiintyvät naarmut on hiottava ja polttoleikkausreuna on siistittävä ennen särmäystä. Mitä kovempaa teräs on, sitä herkempi se on pintavirheille. (5, s. 1.)

### 2.1 Muovattavuuden määrittäminen särmäyksessä

Särmäyksen keskeisimpiä ominaisuuksia ovat tarvittava taivutusvoima, takaisinjouston suuruus ja pienin sallittu taivutussäde ilman aihiossa syntyviä vikoja. Lujuuden kasvaessa kasvavat myös taivutusvoima, taivutussäde ja takaisinjousto. Nämä ominaisuudet korostuvat etenkin ultralujia teräksiä särmäessä. (2, s. 27.)

Materiaaleille suoritetaan särmäyskokeita, koska materiaalin särmättävyys koostuu useasta eri ominaisuudesta. Särmäyskokeissa selvitetään muovattavuutta kuvaava  $R/t$ -luku, jossa  $R$  on taivutussäde ja  $t$  on levyn paksuus. Särmäyskokeessa haetaan pienintä mahdollista taivutussädettä, jolla tietyn materiaalin muovaaminen onnistuu ilman aihioon syntyviä vaurioita. Pieni  $R/t$ -luku kuvastaa hyvää muovattavuutta. Särmäyksessä ei ole suurempia ongelmia, kun  $R/t$  on pienempi kuin 1,5. (2, s. 28.)

### 2.2 Taivutus

Yleisin muovausmenetelmä lujille ohutlevyille on taivutus. Taivuttamiseen käytetään yleensä särmäyspuristinta, jolloin puhutaan särmäyksestä. Särmäykses-

sä aihio taivutetaan puristamalla se haluttuun muotoon työkalujen välissä. Sär-mäyksessä haluttu kulma saavutetaan painimen liikkeen pituudella ja haluttu taivutussäde painimen muodolla. Muovauksessa syntyy vetoa ja puristusta. Ai-hion ulkopinta venyy ja sisäpinta tyssääntyy. Materiaalin vahvuus muovausalu-eella muuttuu vain vähän. Suoraviivaiseen taivutukseen voidaan käyttää taivu-tuskonetta tai särmäyspuristinta. (2, s. 25.)

Teräksen särmättävyys on vahvasti riippuvainen materiaalin sitkeydestä, muok-kauslujittumisesta ja lujuusominaisuuksista. Särmättävyys on yleensä ilmoitettu pienimmän taivutussäteen ja levyn paksuuden suhteen. Kaiken kaikkiaan kor-keampi lujuus tarkoittaa parempaa taivutussädettä. Suurempi kovuus taas ai-heuttaa sen, että materiaali on herkempi pintavaurioille. Korkeampi lujuus vai-kuttaa myös taivutus- ja takaisinjoustovoimaan. Särmättävyyttä voidaan paran-taa käyttämällä paikallista lämpökäsittelyä ilman, että teräksen lujuus alenee merkittävästi. (5, s. 1.)

Särmätyissä rakenteissa sisempi taive on herkin murtumien alkamiselle johtuen jäännösjäännityksistä dynaamisessa kuormituksessa. Lisäksi sisätaipeen mur-tumat ovat todella vaikeita havaita. (5, s. 1.)

Teräksen kovuus aiheuttaa ongelmia myös materiaalin leikkaamisessa. Materi-aalin käsittely voi olla haastavaa, jos materiaalin kovuus on lähellä käytetyn työ-kalun kovuutta. Tämä aiheuttaa korkeita voimia leikkaustyökaluun ja konee-seen. Kovat voimat aiheuttavat työkalun nopeaa kulumista ja ennen aikaista rik-koutumista. (6, s. 1.)

### **2.2.1 Pintavaurioiden vaikutus teräksen taivutettavuuteen**

Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tekemässä tutkimuksessa on tutkittu pintavirheiden vaikutusta ultralujan teräksen särmättävyyteen. Työn tar-koitus oli määrittää, kuinka suuri pintavaurion tulee olla, jotta särmäysprosessi epäonnistuu. Kovuuden vaikutus oli ennalta määrätty käyttämällä kovuusluokki-en 340 HV1 ja 550 HV1 teräslaatuja. Testimateriaaleina on käytetty 4 mm pak-sua suorasammutettua (Direct Quenched) bainiittis-martensiittista ultralujaa

DQ960-rakenneterästä ja kulumisen kestävä AR500-terästä. Pintarailot tehtiin laserablaatiolla. Naarmujen syvyyden vaikutus määritettiin särmäämällä näytekappaleet 90 asteen kulmaan. Särmäyskohtia verrattiin visuaalisesti. Särmäykset luokiteltiin suurimman saavutetun railon mukaan, joka ei aiheuttanut vauriota taipeeseen särmäyksen aikana. Tulokset osoittivat, että kriittinen halkeaman koko on vahvasti riippuvainen levyn kovuudesta. Testimateriaalien vertailu osoitti, että 36 %:n lasku kovuudessa kasvattaa kriittisen railon kokoa 138 %.

(5, s. 1.)

### Testimateriaalit

DQ960 on termomekaanisesti valssattu ja suorasammutettu rakenneteräs. Sen alin myötölujuus on 960 MPa ja murtolujuus 1 000 MPa. Mikrorakenne on bainiittis-martensiittinen. Pienin suositeltu taivutussäde on 14 mm ja särmättävyyden suhdeluku  $R/t = 3,5$ . AR500 on kulutusta kestävä teräs, jonka alin myötölujuus on 1 250 MPa ja murtolujuus 1 600 MPa. Teräs on kovetettu vesikarvaisella (5, s. 1). Taulukossa 1 on esitetty testimateriaalien mekaaniset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus. Taulukon 1 kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet ovat valmistajan vakuuttamia nimellisarvoja. (5, s. 2.)

*TAULUKKO 1. Tutkimusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus (5, s. 2)*

Chemical composition (in wt-%)					Mechanical properties								
Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	YS (MPa)	TS [MPa]	TE (%)	R/t
DQ960	0.11	0.25	1.2	0.02	0.01					960	1000	7	3.5
AR500	0.3	0.7	1.7	0.03	0.015	1.5	0.8	0.5	0.004	1250	1600	8	10

### Tutkimusmenetelmät

Testimateriaalien mekaaniset ominaisuudet olivat määritetty veto- ja kovuuskokeilla. Vetokokeessa käytetty kone oli Zwick300 ja mittausjärjestelmänä käytettiin Aramis 2D -ohjelmaa. Testimateriaalien kovuusprofiili mitattiin käyttäen Struers Duramin A300 -testeriä. (5, s. 2.)

Testimateriaalit särmättiin Ursviken Optima M-4721 -särmäyspuristimella. Testilevyjen mitat olivat 100 mm x 100 mm. Särmäykset tehtiin pitkittäin valssausuuntaan nähden. Lopullinen särmäyskulma oli 90 astetta. Särmäykset tehtiin

pitkittäin valssaussuuntaan nähden, koska testimateriaalien särmättävyys on huonompi kyseiseen suuntaan. Taivutussäteenä käytettiin pienintä suositeltua 14 mm:n taivutussädettä. Vastimen v-aukon leveys oli 45 mm. Särämäykset suoritettiin vähintään kolme kertaa molemmilla teräslaaduilla. (5, s. 2.)

Särmäystestit tehtiin käyttämällä 1) tavallisia kappaleita ja 2) kappaleita, joissa oli ennalta määrättyjä pintavaurioita. Pintavauriot tehtiin SIEMENS Microbeam 3 200 -laserilla. Pintarailot olivat 30 mm pitkiä ja ne tehtiin särmäyskohdan keskelle. Laserablaatiolla syntyneiden railojen syvyydet olivat 15, 37, 58 ja 88  $\mu\text{m}$ . (5, s. 2.)

## Tulokset

Veto- ja kovuuskokeiden tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Molemmat testimateriaalit ylittivät taatut mekaaniset ominaisuudet. DQ960-teräksen keskimääräinen myötölujuus oli 1 056 MPa, keskimääräinen murtolujuus 1 146 MPa ja keskimääräinen kovuus 346 HV1 (5, s. 2). AR500-teräksen keskimääräinen lujuus oli 538 HV1. Mitattu myötölujuus oli 1 479 MPa ja murtolujuus 1 723 MPa. Iskusitkeys oli yhtäläinen DQ960-teräksen kanssa, mutta särmäystestit paljastivat DQ960-teräksen särmättävyyden olevan selvästi AR500-terästä parempi. (5, s. 2.)

*TAULUKKO 2. Vetokokeen tulokset; LO = pitkittäinen, TR = poikittainen, AVG = keskimääräinen, S.D. = standardi poikkeama (5, s. 3)*

DG960					WR500			
	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>gt</sub> [%]	A <sub>t</sub> [%]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>gt</sub> [%]	A <sub>t</sub> [%]
LO_AVG	1065	1138	3.4	9.7	1464	1691	3.9	8.3
LO_S.D. [%]	1	1	7	3	1	1	7	4
TR_AVG	1046	1153	2.7	7.3	1495	1756	3.4	6.5
TR_S.D. [%]	1	1	7	8	0	0	2	8
AVERAGE	1056	1146	3.1	8.5	1479	1723	3.6	7.4

TAULUKKO 3. DQ960-teräksen ja WR500-teräksen kovuuskokeiden tulokset  
(5, s. 3)

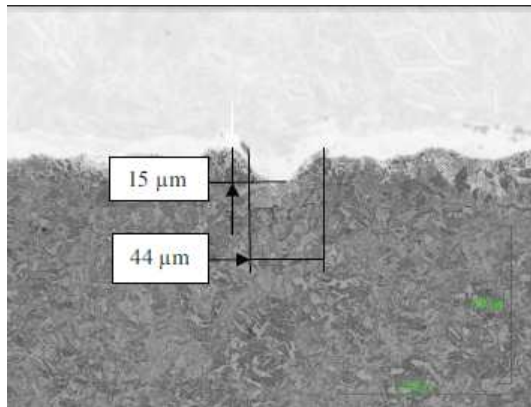
DQ960: AVG = 346 HV1						
Depth [mm]	AVG [HV]	Test results				
Top						
0,25	341	353	342	340	339	330
0,75	352	332	348	367	356	358
1,25	357	373	353	351	345	363
1,75	349	347	351	340	347	358
2,25	348	332	349	341	363	356
2,75	342	325	334	368	346	339
3,25	357	353	356	358	361	356
3,75	324	326	322	325	320	329
Bottom						
	AVG [HV]	343	344	349	347	349

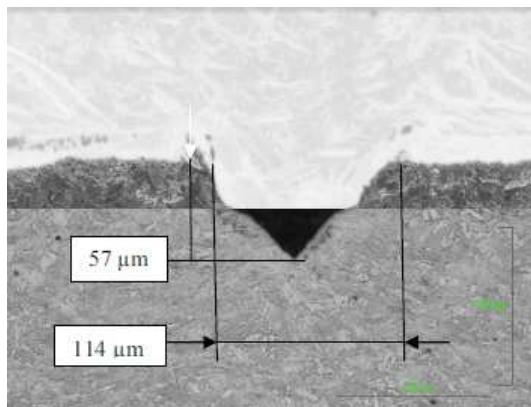
WR500: AVG = 538 HV1						
Depth [mm]	AVG [HV]	Test results				
Top						
0,25	533	526	538	539	529	533
0,75	542	550	547	534	545	536
1,25	544	543	547	545	534	552
1,75	529	527	524	526	543	524
2,25	542	543	531	543	545	549
2,75	541	545	533	552	543	533
3,25	539	549	534	534	536	541
3,75	530	524	538	531	529	529
Bottom						
	AVG [HV]	538	537	538	538	537

**Särmäystesti, WR500:** Särmäystestit paljastivat maksimaalisen railon koon, joka ei aiheuta vauriota särmäyksen aikana. Kuvasta 1 selviää ennalta määrätyn railon geometria, joka ei levinnyt särmättäessä. Railon syvyys on 15 µm. Vaikka näkyvää murtumaa ei havaittu, kuvasta 2 näkee 15 µm syvän railon avautuneen muovauksen aikana. Vaurio oli havaittavissa kun railon koko kas-

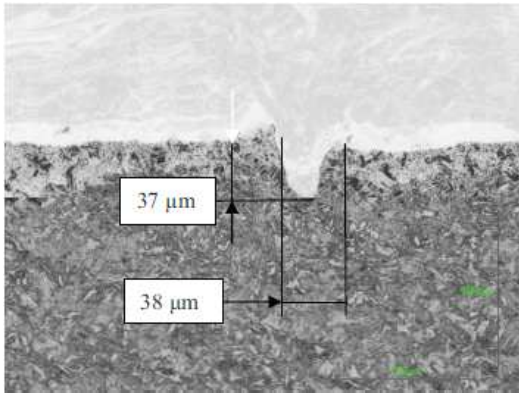
voi 37:ään mikrometriin (kuva 3). Kaksi neljästä testikappaleesta halkesivat täysin ja kaksi muuta olivat visuaalisesti vahingoittumattomia. (5, s. 3.)



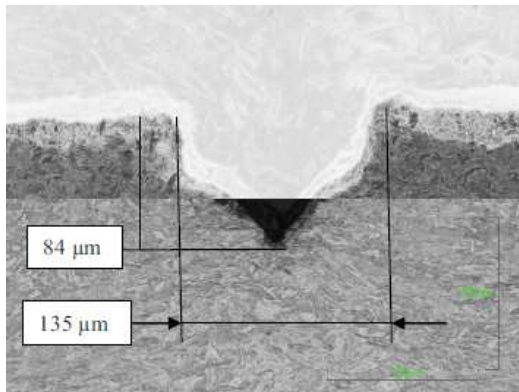
*KUVA 1. Laserilla tehdyn 15 μm syvän railon mitat  
WR500-teräksen pinnalla ennen särmäystä (5, s. 4)*



*KUVA 2. Laserilla tehdyn 15 μm syvän railon mitat  
WR500-teräksen pinnalla särmäyksen jälkeen (5, s. 4)*



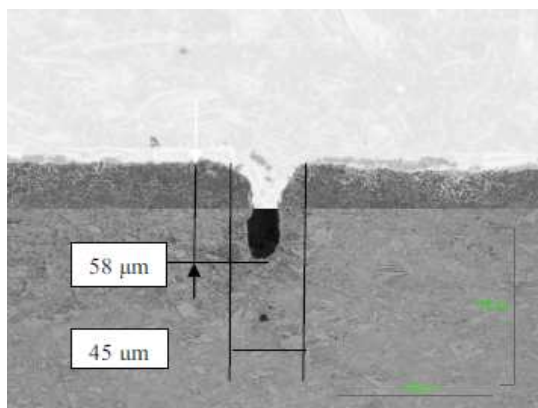
*KUVA 3. Laserilla tehdyn 37 μm syvän railon mitat  
WR500-teräksen pinnalla ennen särmäystä (5, s. 4)*



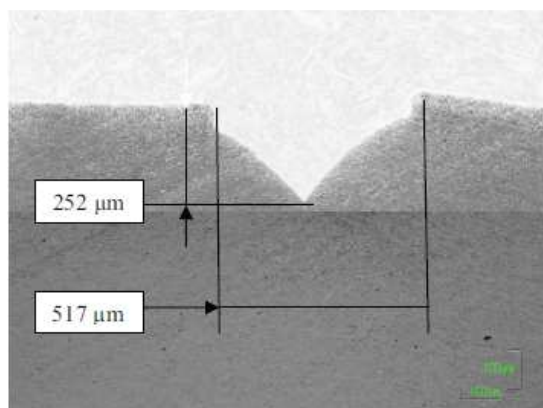
*KUVA 4. Laserilla tehdyn 37 μm syvän railon mitat  
WR500-teräksen pinnalla särmäyksen jälkeen (5, s. 4)*

**Särmäystesti, DQ960:** Särmäystestit osoittivat, että DQ960-rakenneteräksen vaurioon tarvittava railokoko oli merkittävästi suurempi verrattuna AR500-kulutusteräkseseen. Vaurio oli havaittavissa kun railon koko kasvoi 58:sta mikrometristä (kuva 5) 88:aan mikrometriin (kuva 7). Testimateriaalien vertailu osoittaa, että 36 %:n lasku kovuudessa kasvattaa kriittisen railon kokoa 138 % (taulukko 4). Kuvissa 5 - 8 on esitetty ennaltamäärättyjen railojen mitat ennen ja jälkeen särmäyksen. (9, s. 4.)

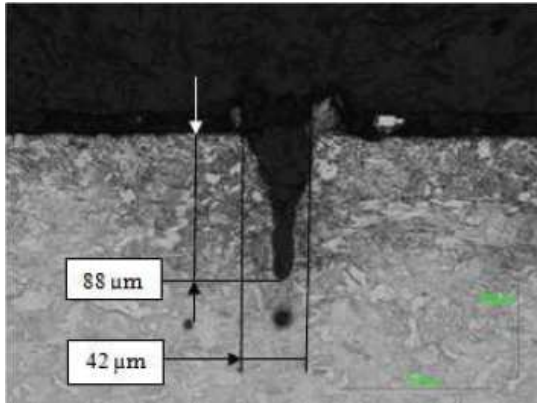




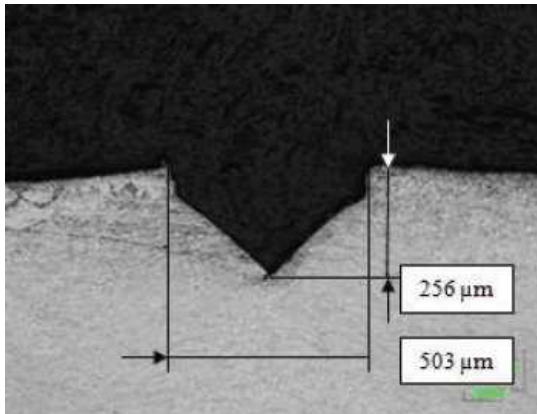
*KUVA 5. Laserilla tehdyn 58 μm syvän railon mitat DQ960-teräksen pinnalla ennen särmäystä (5, s. 4)*



*KUVA 6. Laserilla tehdyn 58 μm syvän railon mitat DQ960-teräksen pinnalla särmäyksen jälkeen (5, s. 4)*



KUVA 7. Laserilla tehdyn 88  $\mu\text{m}$  syvän railon mitat  
DQ960-teräksen pinnalla ennen särmäystä (5, s. 5)



KUVA 8. Laserilla tehdyn 88  $\mu\text{m}$  syvän railon mitat  
DQ960-teräksen pinnalla särmäyksen jälkeen (5, s. 5)

TAULUKKO 4. Testimateriaalien kriittiset railokoot, jotka aiheuttavat vaurion  
särmäyttäessä (5, s. 5)

Test material	Critical crack size
AR500	37 $\mu\text{m}$
DQ960	88 $\mu\text{m}$

### Yhteenveto

Tutkimus esittelee kokeellisia testituloksia ennalta määrättyjä pintarailoja sisältävien ultralujien terästen särmäyksestä. Testimateriaaleina käytettiin suorasammutettua 346 HV1 -kovuusluokan DQ960-rakenneterästä ja 538 HV1 -kovuusluokan AR500-kulutusterästä. DQ960-teräksen kriittinen railokoko oli 88

mikrometriä ja AR500-teräksen kriittinen railokoko oli 37 mikrometriä. Materiaalien välinen kovuusero oli 192 HV1, joten DQ960-teräksen kovuus oli 36 % pienempi kuin AR500-teräksen. DQ960-teräksen havaittu kriittinen railokoko oli 138 % suurempi. Tulokset osoittavat, että pinnan herkkyys ei korreloi lineaarisesti kovuuden kanssa. Kulutusta kestäväällä materiaalilla vaurioita ilmaantui yllättäen, mutta rakenneteräs vastusti railon leviämistä tehokkaammin, eikä äkillisiä vaurioita havaittu. (5, s. 5.)

### **2.2.2 Teräksen vaiheittainen taivutus**

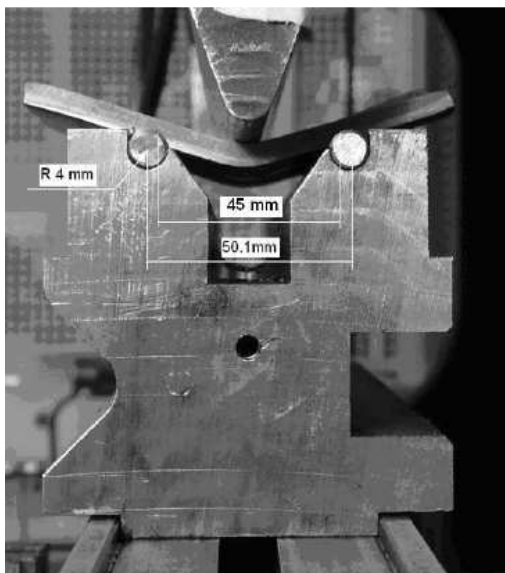
Ultralujien terästen särmäyksessä teräksen jännitykset ja huono muokattavuus voivat aiheuttaa muovattavuusongelmia ja mittavaihteluita. Korkeampi lujuus johtaa kasvavaan takaisinjousto- ja murtumien todennäköisyys kasvaa. Materiaalit murtuvat helposti pienillä taivutussäteillä, joten ultralujien terästen suositellut pienimmät taivutussäteet ovat melko suuria. Ultralujien terästen käyttö vaatii kehitystä tai täysin uusia menetelmiä, jotta särmien laatu saadaan vaaditulle tasolle. (7, s. 1.)

Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tekemässä tutkimuksessa on tutkittu ultralujien terästen särmättävyyttä. Testissä käytetyt teräksen olivat bainiittis-martensiittisiä ultralujia monifaasiteräksiä (complex phase steel). CP960-teräksen myötölujuus oli 960 MPa ja murtolujuus 1 000 MPa. CP1100-teräkselle vastaavat arvot olivat 1 100 MPa ja 1 250 MPa. Arvot ovat valmistajan vakuuttamia minimiarvoja. Teräkset särmättiin inkrementaalisesti eli vaiheittain. Särmäykset suoritettiin pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden. Särmäykseen käytettiin särmäyskonetta ja lopullinen särmäyskulma oli 90 astetta. Inkrementaalisen särmäyksen särmäyskulmat olivat 150°, 130°, 110° ja 90°. Tutkimuksessa esitetyt tulokset osoittavat, että inkrementaalinen särmäys ei tuota parempia tuloksia kuin perinteinen kertapainalluksena suoritettu särmäys. Tutkitut teräkset voidaan kuitenkin särmätä inkrementaalisesti vastoin valmistajan suosituksia. (7, s. 1.)

## Tutkimusmenetelmät

Testimateriaalien mekaaniset ominaisuudet ja kovuusprofiilit oli määritetty veto- ja kovuuskokeilla. Vetokokeessa käytetty kone oli Zwick300 yhdessä Aramis 3D -ohjelmiston kanssa. Vetokokeet tehtiin valssaussuuntaan nähden pitkittäin, poikittain ja 45 asteen kulmassa. Testimateriaalien kovuusprofiilit mitattiin Struers Duramin A300 -testerillä. (7, s. 1.)

Testimateriaalit särmättiin inkrementaalisesti Ursviken Optima M-4721 -särmäyskoneella. Isku löysättiin jokaisen särmäysvaiheen jälkeen. Testimateriaalit särmättiin molemmiin puolin, jotta aihion kummatkin puolet tulivat testatuiksi ulomman taipeen ja sisemmän taipeen osalta. Testimateriaalit särmättiin erilaisilla taivutussäteillä. Vastimen v-aukon leveys oli 45 mm kaikissa särmäyksissä (kuva 9). (7, s. 1.)



*KUVA 9. Särmäysprosessi (7, s. 2)*

Särmäysprosessi videoitiin Panasonic DMC-LX2 -digitaalikameralla (kuva 10). Videomateriaalia käytettiin takaisinjoustoprosessin laskemiseen käyttämällä kahta pysäytyskuvaa: yksi kuva, kun kulma on pienimmillään ja toinen, kun painin irrotettiin aihioista. Kulmat mitattiin käyttäen DWGeditor-ohjelmaa. Kaikki särmäykset tarkistettiin visuaalisesti ulomman taipeen ja reunojen osalta, ettei niissä esiinny halkeamia. Ulompi taive mitattiin myös tarkalla optisella Nikon Nexiv VM-3020

-koordinaattimittauskoneella. Taiteiden muokkauslujittumisen suhde saatiin mittaamalla taiteiden kovuus Vickerin menetelmällä Struers Duramin A300 -testerillä. Särämäyskulmat mitattiin kulmamitalla. Tuloksia verrattiin perinteisellä tavalla tehtyihin särämäyksiin. (7, s. 2.)



*KUVA 10. Särämäystestin kuvaus (7, s.2)*

## **Tulokset**

Testimateriaalien vetokoetulokset on esitetty taulukossa 5. Vetokoetulokset osoittavat, että testimateriaalien venymäominaisuudet ovat yhteneviä. Kun vetokokeet tehtiin valssaussuuntaan nähden poikittain, molemmat testimateriaalit muovautuivat paremmin etenkin murtolinjan kohdalta. Tässä tapauksessa myötö- ja murtolujuus olivat hieman parempia pitkittäissuuntaisiin vetoihin verrattuna. Kaikenkaikkiaan mitatut myötölujuudet olivat noin 100 MPa korkeampia kuin valmistajan lupaamat 960 MPa ja 1 100 MPa. Mitatut myötö-/murtolujuussuhteet olivat keskimäärin CP960-teräksellä 0,92 ja CP1100-teräksellä 0,91. (7, s. 2.)

TAULUKKO 5. Vetokoetulokset CP960 ja CP1100; LO = pitkittäinen, TR = poikittainen (7, s. 3)

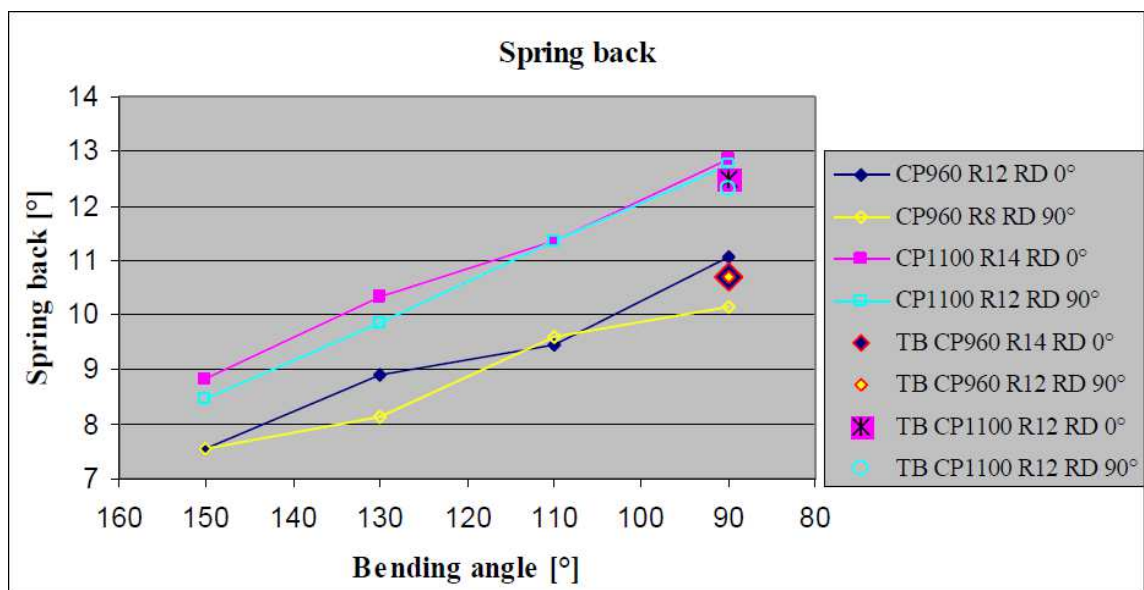
CP960 4mm									CP1100 4mm								
					Aramis									Aramis			
					Breakline		50 mm							Breakline		50 mm	
	YS	TS	UE	TE	TS	TE	UE	TE		YS	TS	UE	TE	TS	TE	UE	TE
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[%]		[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[Mpa]	[%]	[%]	[%]
45°	1047	1134	1.6	7.1	1323	51	2.6	8.6	45°	1212	1340	1.9	7.4	1538	45	2.8	7.3
LO	1065	1138	2.2	7.9	1333	50.2	3.4	9.7	LO	1196	1301	2.3	7.9	1511	43.9	3.3	8.7
TR	1046	1153	1.7	6.4	1314	37.9	2.7	7.3	TR	1216	1362	2	6.7	1512	30.2	2.9	6.8
Average	1053	1142	1.8	7.1	1323	46.4	2.9	8.5	Average	1208	1334	2.1	7.3	1520	39.7	3.0	7.6

Vickerin kovuustestin tulokset esitetään taulukossa 6. CP960-teräksen keskimääräinen kovuus oli 350 HV1 ja CP1100-teräksen keskimääräinen kovuus oli 440 HV1. Valssausprosessista johtuen kummankin teräksen ylävyöhykkeet olivat kovempia kuin alavyöhykkeet. CP960-teräksen kovuuden vaihteluväli oli 309 - 377 HV1 ja CP1100-teräksen 409 - 464 HV1. CP1100-teräksen kovuus on keskimäärin 26 % korkeampi kuin CP960-teräksen. (7, s. 3.)

TAULUKKO 6. Kovuustestin tulokset CP960 ja CP1100 (7, s. 3)

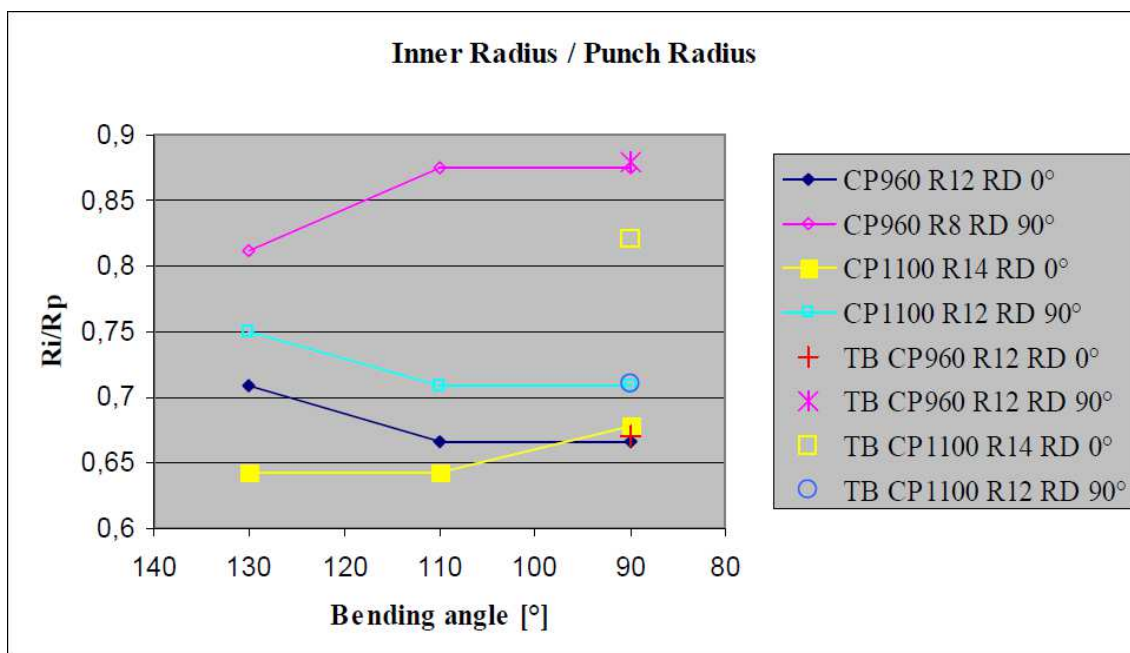
CP960, AVG ~350 HV											CP1100, AVG ~440 HV										
Depth [mm]	AVG [HV]	Test results								Palet	Depth [mm]	AVG [HV]	Test results								Palet
Top	343	342	350	347	353	342	340	339	330	375-384	Top	426	426	431	429	421	426	426	433	415	455-464
0,6	356	377	363	366	309	348	367	356	358	365-374	0,6	448	438	430	444	441	450	458	458	464	445-454
1,1	359	361	368	-	373	353	351	345	363	355-364	1,1	451	447	443	457	461	443	447	453	460	435-444
1,7	344	335	342	334	347	351	340	347	358	345-354	1,7	439	409	435	446	442	439	444	451	447	425-434
2,3	349	368	345	339	332	349	341	363	356	335-344	2,3	445	447	447	442	446	441	446	458	435	415-424
2,9	344	338	351	347	325	334	368	346	339	325-334	2,9	432	434	441	429	434	437	424	433	425	405-414
3,4	351	334	348	342	353	356	358	361	356	315-324	3,4	419	415	416	424	419	412	424	420	420	
Bottom	329	348	335	325	326	322	325	320	329	305-314	Bottom	417	409	416	424	419	412	424	420	415	

Inkrementaalisesti särmätyn ultralujan teräksen takaisinjousto oli yhtäläinen perinteisellä menetelmällä särmätyyn teräkseen verrattuna (kuva 11). Takaisinjousto kasvaa lineaarisesti särmäyskulman kasvaessa. Valssaussuunnalla ei ollut merkitystä. (7, s. 3.)



KUVA 11. Mitatut takaisinjoustoarvot. TB = perinteinen särmäys, R = painimen säde, RD = valssaussuunnan asema taipeeseen nähden. (7, s. 3)

Sisempi taivutussäde ( $R_i$ ) mitattiin kaikilla materiaaleilla (kuva 12). Kaikki testatut materiaalit menettivät kosketuksen painimeen. Kosketuksen menettäminen on vähäisempää, kun levy särmätään poikittain valssaussuuntaan nähden. Taivutussäde oli yhtäläinen perinteisellä ja inkrementaalisella särmäysmenetelmällä. (7, s. 4.)

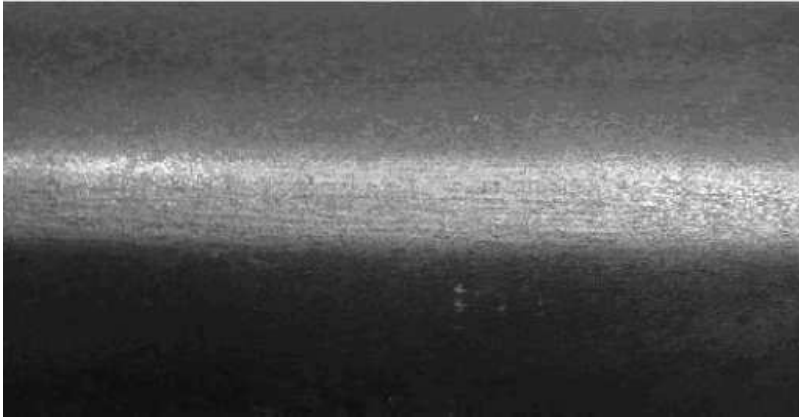


KUVA 12. Painimen säteen ja sisemmän säteen suhde. TB = perinteinen taivutus,  $R$  = painimen säde, RD = valssaussuunnan asema taipeeseen nähden. (7, s. 4)

Kaikki särmät tarkistettiin visuaalisesti ja mitattiin tarkalla optisella Nikon Nexiv VM-3020 -koordinaattimittauskoneella. Mittauskoneen avulla suoritettiin mittaukset taipumien pinnasta. Mittausdata paljasti taipumien geometrian ja pinta-vauriot. Reunat ja ulommat taipeet tarkistettiin visuaalisesti. Mahdollisia sisempien taiteiden vaurioita ei voinut havaita visuaalisesti. (7, s. 4.)

Lähes kaikki reunat olivat murtuneet johtuen pääosin mekaanisesta leikkauksesta. Reunan murtuma on todennäköisempää, jos mekaanisesti leikatun reunan purse on ulkوتاipessa. Kuvissa 13 ja 14 näkyvät testikappaleen viat. Testimateriaalin särmättävyys oli parempi, kun särmäys tehtiin poikittain valssaussuuntaan nähden. Virheiden määrä alkoi lisääntyä, kun särmäyskulma ja painimen säde ( $R_p$ ) pienenevät. Ulommalla taifeella havaittiin erityyppisiä vikoja. Pienin vika oli ohut jännitysvenymä. Kun painimen säde pieneni, jännitysvenymä tuli leveämmäksi ja syvemmäksi ja kehittyi lopulta halkeamaksi. Ulommalla taifeella on usein mahdollista nähdä ja tuntea tasainen huippu. (7, s. 4.)





*KUVA 13. Ohuita jännitysvenymiä ulommalla pinnalla (CP1100, RD 0°, painimen säde 14 mm (7, s. 5)*



*KUVA 14. Reunojen murtumia taieessa (CP1100, RD 0°, painimen säde 14 mm) (7, s. 5)*

Pienimmät hyväksyttävät taivutussäteet on esitetty taulukossa 7. Ainoa merkittävä poikkeus syntyi, kun CP960 särmättiin poikittain valssaussuuntaan nähden. Inkrementaalisella särmäyksellä 8 mm:n säde saavutettiin ilman näkyviä murtumia. Perinteisellä särmäyksellä saavutettiin 12 mm:n säde. Tilastollinen luotettavuus vaatii lisää tutkimuksia. (7, s. 5.)

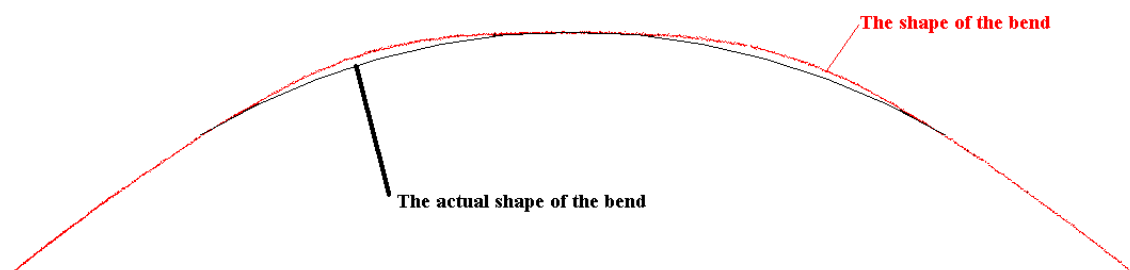
TAULUKKO 7. Testimateriaalien pienin taivutussäde ilman näkyviä murtumia.

(IB) = inkrementaalisesti särmätty ja (TB) = perinteisesti särmätty (7, s. 5)

t [mm]	Material	45 mm v-die	
		R <sub>punch</sub> [mm]	Geometry
4	(IB) CP 960 RD 0°	14	ok
	(IB) CP 960 RD 90°	8	flat top
4	(IB) CP 1100 RD 0°	14	flat top
	(IB) CP 1100 RD 90°	12	flat top
4	(TB) CP 960 RD 0°	14	ok
	(TB) CP 960 RD 90°	12	flat top
4	(TB) CP 1100 RD 0°	16	ok
	(TB) CP 1100 RD 90°	12	flat top

Joustavalla rullamuovauksella testimateriaalit voidaan särmätä pienemmällä sisätaipeen säteellä kuin inkrementaalisella tai perinteisellä särmäyksellä. Joustavassa rullamuovauksessa testimateriaalien pienin sisätaipeen säde on CP960-teräksellä 38 % pienempi ja CP1100-teräksellä 58 % pienempi kuin inkrementaalisessa särmäyksessä. (7, s. 5.)

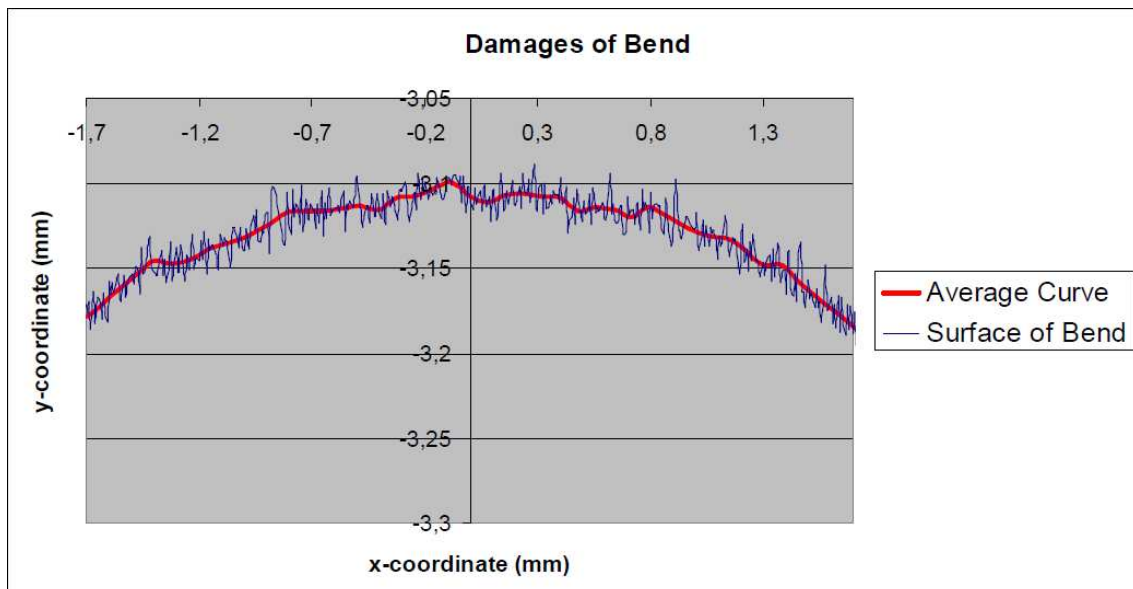
Taipumien geometriat ja vauriot mitattiin myös Nikon Nexiv VM-3020 -koordinaattimittauskoneella. Tavoitteena oli löytää visuaalista tarkastelua parempi tapa pintavaurioiden arviointiin. Mittaukset tehtiin taipuman kolmesta kohdasta. Mittauskohdat olivat 60, 160 ja 260 mm:n päässä reunasta. Taipuman todellinen muoto piirrettiin DWGeditor-ohjelmalla. Todellista muotoa verrattiin taipuman muotoon (kuva 15). (7, s. 5.)



KUVA 15. Taipeen muoto (punainen kaari) ja taipeen vastaava todellinen muoto (musta kaari). (7, s. 5)

Tyypillinen ultralujan teräksen geometrinen virhe paljastui taipuman reunoista. Epämääräistä muodonmuutosta alkoi ilmestyä kun särmäyskulma oli alle  $110^\circ$  kaikissa särmäyksissä. Epämääräistä muodonmuutosta voidaan lisätä pienentämällä painimen sädettä. (7, s. 6.)

Mittauspisteisiin pohjautuva käyrä piirrettiin Excel-ohjelmalla. Käyrä osoitti taipuman muodon ja pinnan vauriot (kuva 16). Keskimääräinen käyrä (Average Curve) tehtiin vaurioiden vertailemiseksi. Railot olivat keskimäärin vaihteluvälillä  $10 - 25 \mu\text{m}$ . Merkittävimmät virheet olivat lähellä taipuman keskikohtaa ja ne johtuivat venymistä aiheuttavasta korkeasta rasituksesta. Virheitä ilmaantui tavallista vähemmän, jos taipuman keskikohta oli matala. Tulokset olivat niin yhteneviä, että virheiden laatua on vaikea luokitella. (7, s. 6.)



KUVA 16. Taieen muoto ja vauriot (CP960, RD  $90^\circ$ , painimen säde 8 mm, särmäyskulma  $130^\circ$ ) (7, s. 6)

Taiteiden ylä- ja alapintojen keskimääräinen kovuus on esitetty taulukossa 8. Tulokset osoittavat, ettei kovuuksissa ole merkittäviä eroja inkrementaalisen ja perinteisen taivutuksen välillä. Tämä osoittaa, että muokkauslujittuminen särmäysten kesken on samanlainen. Kovuus korreloi lineaarisesti muokkauslujittumista, joten muokkauslujittuminen voidaan laskea kovuusarvoista. Muokkauslujittumissuhteet poikkeavat jonkin verran toisistaan. Joissain tapauksissa muokkauslujittumisen suhde on suurempi inkrementaalisesti särmätyissä kuin perinteisesti särmätyissä aihioissa ja toisinpäin. Tästä voidaan päätellä, ettei särmäysmenetelmällä ole johdonmukaista vaikutusta muokkauslujittumissuhteeseen. (7, s. 6.)

TAULUKKO 8. Särmätyjen aihoiden keskimääräinen kovuus (7, s. 7)

	incrementally bended		traditionally bended	
	lower surface	upper surface	lower surface	upper surface
CP 960 RD 0°/R12/A	363	399	368	396
/B	375	398	381	399
CP 960 RD 90°/R8/A	370	398	370	404
/B	389	399	385	397
CP 1100 RD 0°/R14/A	437	442	430	454
/B	423	442	435	452
CP 1100 RD 90°/R12/A	428	449	443	440
/B	421	436	419	447

### Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa on esitetty ultralujan teräksen särmäyksen testitulokset. Testatut teräkset CP960 ja CP1100 olivat ultralujia bainiittis-martensiittisiä monifaasiteräksiä. Testitulokset osoittavat, että inkrementaalinen särmäys ei tuota parempia tuloksia perinteiseen särmäykseen verrattuna. Inkrementaalisen särmäyksen tulokset eivät myöskään vastaa joustavan rullamuovauksen tuloksia. Joustavassa rullamuovauksessa testimateriaalit saadaan särmätyä sisäsäteeltään noin 38 - 58 % pienemmiksi verrattuna inkrementaaliseen särmäykseen.

Inkrementaalisessa särmäyksessä materiaali muovautuu kerralla koko särmäysalueelta, kun taas rullamuovauksessa materiaali muovautuu hiljalleen ja tasaisena virtana. (7, s. 8.)

Ainoa merkittävä poikkeus oli CP960-teräksen särmäys poikittain valssaussuuntaan nähden. Inkrementaalisella särmäyksellä saavutettiin 8 mm:n säde ilman näkyviä murtumia. Perinteisellä särmäysmenetelmällä säde oli 12 mm. Tilastollinen luotettavuus vaatii lisää testejä. Tutkitut teräkset voidaan kuitenkin särmäätä inkrementaalisesti vastoin valmistajien suosituksia. (7, s. 8.)

### 3 TERÄKSEN NOPEAT LÄMPÖKÄSITTELYMENETELMÄT

Teräksen paikallisilla lämpökäsittelyillä voidaan vaikuttaa teräksen paikallisiin ominaisuuksiin esimerkiksi muovatessa terästä johonkin tiettyyn käyttötarkoitukseen. Joissain tapauksissa teräksen tulee olla kulutusta kestävä ja kovaa, mutta sitä pitää pystyä muokkaamaan esimerkiksi särmäämällä. Teräksen ominaisuuksia muokataan paikallisesti. Kuluvat alueet pyritään saamaan koviksi ja muovattavat alueet halutaan saada pehmeiksi, mutta muokkauslujittuviksi. Lämpökäsittelyillä pyritään myös väsymisominaisuuksien parantamiseen ja niitä käytetään myös hitsien jälkikäsittelyssä. (8, s. 3.)

Paikallisilla lämpökäsittelyillä pyritään mahdollistamaan teräksen parempi jalostettavuus, sillä teräksen ominaisuudet määräävät miten teräsrakenteet ja -osat valmistetaan. Lämpökäsittelyllä vaikutetaan teräksen mikrorakenteeseen, jotta siitä saadaan halutunlainen muokkauksen kannalta. Mikrorakenne vaikuttaa teräksen ominaisuuksiin. Tavoitteena on ultralujien terästen hyödyntäminen entistä monimutkaisemmissa rakenteissa. (8, s. 3.)

Teräksen paikallisessa lämpökäsittelyssä voidaan käyttää erilaisia lämmönlähteitä. Lämmönlähteitä ovat liekkikuumennus, laser, plasma, tig-poltin ja induktio. Induktiota käytetään yleisesti putkien ja palkkien valmistuksessa ja käytettävä induktiokela suunnitellaan tiettyyn käyttötarkoitukseen sopivaksi. Laserin käyttö lämmöntuonnissa on yleistynyt sen monipuolisuuden vuoksi. (8, s. 4.)

#### 3.1 Induktiokuumennus

Induktiokuumennuksessa käytetään generaattoria ja induktiokelaa. Pienellä taajuudella magneettikenttä tunkeutuu syvälle, jolloin voidaan käsitellä paksuja materiaaleja. Suurella taajuudella magneettikenttä kohdistuu pintaan ja tällä menetelmällä onnistuu esimerkiksi pintakarkaisu. Induktiokuumennuksessa lämpö syntyy materiaalin sisälle. Induktiokuumennus ei aiheuta päästöjä, sillä on hyvä hyötysuhde ja kuumentuminen tapahtuu välittömästi. Kuumennusnopeudet ovat suuria ja menetelmä on toistettava ja tarkka. Induktiokuumennus sopii ohuille ja

paksuille levyille. Menetelmä sopii hyvin automatisoituun suurtuotantoon. (8, s. 8.)

### **3.2 Laserlämpökäsittely**

Laser-laitteistolla onnistuu leikkaus, hitsaus sekä lämpökäsittely. Sen ulottuvuus, säädettävyyys ja hallittavuus ovat hyviä. Laserin avulla voidaan käsitellä nurkat, reiät ja vaikeat 3D-geometriat. Lämpötila voidaan kohdistaa aihion pintaan, läpi tai jonnekin näiden välimaastoon. Kuumennus onnistuu muutamista asteista aina sulamispisteeseen asti. Laseria käytetään yleensä 0 - 10 mm paksuille levyille. (8, s. 4.)

Perinteisesti laseria on käytetty avustamaan muokkausta prosessin aikana. Terästä pehmennetään, jolloin sen muokkausvoimat pienenevät ja takaisinjousto ja työkalun kulumisen pienenevät. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän mukaan on olemassa vain muutamia tutkimuksia, jotka osoittavat laserlämpökäsittelyn parantavan muovattavuutta paikallisesti ilman merkittävää lujuuden alenemista. (9, s. 1.)

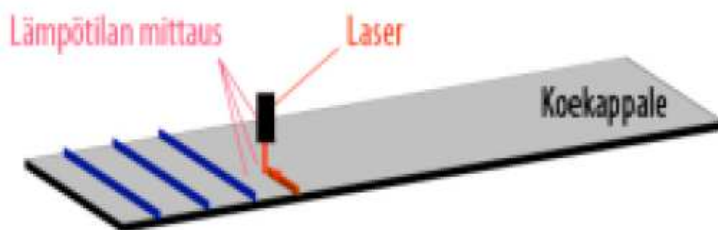
Laserlämpökäsittely on nopea ja hyvin paikallistettava prosessi ja laserilla on laaja-alainen ulottuvuus. Lasereiden kehitys on johtanut tehokkaampiin ja edullisempiin prosesseihin. Nykyisillä laitteistoilla voidaan käsitellä useampia pintoja samanaikaisesti. Haastavinta on kuitenkin lämmöntuonti tasaisesti paksuussuunnassa. (9, s. 1.)

Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä on tehnyt tutkimuksia terästen paikallisiin lämpökäsittelyihin liittyen. Lämpökäsittelyiden käyttöä tutkitaan kulu- tusterästen ja ultralujien rakenneterästen osalta. Tässä työssä perehdytään laserlämpökäsittelyyn ja sen käyttöön teräksen särmäyksessä. Seuraavissa kohdissa on koostettu Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän ULLA-projektin tuloksia erikoisterästen laserlämpökäsittelyn ja särmättävyyden osalta.

## 4 ERIKOISTERÄSTEN LASERAVUSTEINEN TAIVUTUS

Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tutkimuksissa käytettiin Yb: Yag -laseria, jonka teho oli 4 kW. Vaaputusajoissa käytetty laser oli 3,5 kW. Säteen fokus oli säädetty siten, että säteen halkaisija levyn pinnalla oli 19,75 mm. (10, s. 14.)

Kuvassa 17 on esitetty laserlämpökäsittelyn periaate. Laserin kuljetus toteutettiin vaaputtavaa liikettä käyttäen 2 Hz:n taajuudella, jolloin lämpövyöhykkeen syvyyttä ja leveyttä voitiin modifioida levynpaksuuden ja käyttötarkoituksen mukaan. Vaaputuksessa lämpötila vaihteli välillä 900 - 1 200 °C. (10, s. 14, 15.)



KUVA 17. Laserkäsittelyn periaatekuva (11, s. 5)

Laserkäsittelyparametrien löytäminen vaati runsaasti lämpökäsittelykokeita. Moni koemateriaali saavutti lujimman rakenteen, kun raerakenteesta saatiin mahdollisimman hieno. (10, s. 25.)

Koemateriaalien muovattavuutta tutkittiin särmäyskokeiden avulla. Särmäyspuristimena käytettiin Oulun yliopiston konepajan Ursviken Optima M4721 -särmäyspuristinta. Särmäyskulma oli 90° eri taivutussäteitä käyttäen. Särmätävyyden mittana käytettiin minitaivutussäteen ja levynpaksuuden suhdetta R/t. (10, s. 27.)

Särmäyskokeissa määritettiin taivutusvoima, taivutussäde, levyn ohenema taipeen keskellä, muokkauslujittuminen sekä särmäysviat. Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin ominaisuudet, käytetyt työkalut sekä kappaleen paksuus. (10, s. 27.)



Taulukossa 9 on esitetty Optim-teräksien pienimmät valmistajan suosittelemat sisäpuoliset taivutussäteet. Projektissa käytetyille teräksille saadaan taulukosta sisäpuolisen taivutussäteen arvoiksi seuraavat:

- Optim 960 QC 4 mm: 14 mm
- Optim 960 QC 6 mm: 22 mm
- Optim 1100 QC 4 mm: 16 mm
- Optim 1100 QC 6 mm: 25 mm.

Ruukki lupaa Optim-rakenneteräksille erinomaisen muovattavuuden ja särmätävyyden, mitkä perustuvat teräksen puhtauteen ja sulkeumien modifiointiin. (12, s. 23.)

**TAULUKKO 9. Ruukki Optim -terästen pienimmät taivutussäteet. Taivutuskulma 90° (12, s. 26)**

Nauhatuotteet	Levyn paksuus, mm								
		> 2,5	> 3	> 4	> 5	> 6	> 7	> 8	> 10
	≤ 2,5	≤ 3	≤ 4	≤ 5	≤ 6	≤ 7	≤ 8	≤ 10	≤ 12
Pienin sallittu sisäpuolinen taivutussäde, mm									
Optim 500 MC	2	2,5	3	4	4,5	7	8	10	12
Optim 550 MC	2	2,5	3,5	4,5	5,5	8	9	11	-
Optim 600 MC	2,5	2,5	3,5	5	7	9	10	12	-
Optim 650 MC	2,5	3	4	6	8	10	12	14	-
Optim 700 MC	-	3,5	5	6	8	12	14	16	-
Optim 900 QC	9	9	12	15	19	24	24	-	-
Optim 960 QC	10,5	10,5	14	17,5	22	28	28	-	-
Optim 1100 QC	12	12	16	20	25	32	-	-	-

Taulukossa 10 on esitetty Raex-kulutusterästen pienimmät sallitut sisäpuoliset taivutussäteet. Taulukon ohjearvot projektissa käytetyille teräksille ovat seuraavat:

- Raex 500 6 mm: 30 mm poikittain valssaussuuntaan nähden, 36 mm pitkittäin valssaussuuntaan nähden
- Raex 500 10 mm: 50 mm poikittain valssaussuuntaan nähden, 60 mm pitkittäin valssaussuuntaan nähden.

Ruukki suosittelee käyttämään mahdollisimman suuria taivutussäteitä Raex-terästä särmätessä. Särmän kohdalla oleva polttoleikkausreunan karjennut alue

tulee hioa ja särmän kohdalla olevat pintanaarmut on myös hiottava. Särmäys suositellaan suoritettavaksi kertapainalluksella. (12, s. 48.)

**TAULUKKO 10. Ruukki Raex -terästen pienimmät taivutussäteet. Särmäyskulma 90° (13, s. 49)**

Teräslaji	Pienin sallittu sisäpuolinen taivutussäde paksuusalueittain, mm.												
	≤2,5	>2,5 ≤3	>3 ≤4	>4 ≤5	>5 ≤6	>6 ≤7	>7 ≤8	>8 ≤10	>10 ≤12	>12 ≤14	>14 ≤16	>16 ≤18	>18 ≤20
<b>Raex, nauhalevyt ja kvarttolevyt</b>													
Raex 300 <sup>1) 2)</sup>	7,5	9	12	15	18	21	24	–	–	–	–	–	–
Raex 400 <sup>1)</sup>	7,5	9	12	15	18	21	24	30	36	42	48	54	60
Raex 400 <sup>1)</sup>	10	12	16	20	24	28	32	40	48	56	64	72	80
Raex 450 <sup>1)</sup>	10	12	16	20	24	28	32	40	48	56	64	72	80
Raex 450 <sup>1)</sup>	12,5	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
Raex 500 <sup>1)</sup>	–	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
Raex 500 <sup>1)</sup>	–	18	24	30	36	42	48	60	72	84	91	108	120

<sup>1)</sup> Taivutussärmä levyn valssaussuuntaan nähden poikittain.

<sup>2)</sup> Taivutussärmä levyn valssaussuuntaan nähden pitkittäin.

Taulukossa 11 on esitetty Miilux-terästen taivutusarvot. Näille teräksille suositellaan mahdollisimman suuria taivutussäteitä. Suositeltavat taivutussäteet ovat samaa luokkaa kuin Ruukin Raex 500 -teräksille:

- Miilux 500 6 mm: painimen säde noin 30 mm
- Miilux 500 10 mm: painimen säde noin 50 mm.

**TAULUKKO 11. Miilux-kulutusterästen taivutusarvot (14, s. 4)**

Teräsluokka	Paksuus	Vapaa taivutus <90° Painimen pyöristyssäde/levyn paksuus R/t taivutuslinja valssaussuuntaan nähden		Vapaa-aukon leveys/levyn paksuus W/t		Taivutus V-uraan 90°
		Poikittain	Pitkittäin	Poikittain	Pitkittäin	
<b>Miilux® 400</b>	5–20 mm	3,0	4,0	9,0	11,0	~ 15,0
<b>Miilux® 450</b>	5–20 mm	4,0	5,0	11,0	13,0	~ 15,0
<b>Miilux® 500</b>	2,5–20 mm	~ 10,0	~ 12,0	23,0	27,0	-

#### 4.1 Optim 960 QC 4 mm

Optim 960 QC:n laserlämpökäsittelyparametreiksi valittiin särmätessä seuraavat arvot:

- Ajo2; 3,5 kW teho, 5 mm/s, 12 mm:n amplitudi, 2 Hz:n taajuus
- Ajo3; 3,5 kW teho, 4 mm/s, 16 mm:n amplitudi, 2 Hz:n taajuus.

Alustavassa särmäyskokeessa 4 mm paksu 960 QC särmättiin laser käsittelyiden Ajo2 ja Ajo3 avulla yhden millimetrin taivutussäteellä ilman vaurioiden syntymistä. Särmäys tehtiin poikittain valssaussuuntaan nähden. Alkuperäinen materiaali murtui alle 14 mm:n taivutussäteellä. Optim 960 QC -teräksen särmättävyys osoittautui hieman heikommaksi pitkittäiseen suuntaan särmättäessä (11, s. 16). Taulukossa 12 on esitetty 4 mm paksun Optim 960 QC -teräksen alustavat taivutusarvot.

TAULUKKO 12. 4 mm paksun Optim 960 QC:n alustavat taivutukset

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	Takaisinjousto	R/t
Perusmateriaali	W45/R14/90°	Reunasärö Hyvin ohut pintasärö	11°	3,5
Ajo2 (Pitkit- tään/poikittain)	W45/R8/90°	OK		2
Ajo2 (Pitkit- tään/poikittain)	W45/R4/90°	OK	7°	1
Ajo2 (Pitkit- tään/poikittain)	W45/R1/90°	Poikittain OK	6,5°	1/4
Ajo3 (Pitkittäin)	W45/R1/90°	Hyvin ohut pintasärö		1/4

Lopullisessa särmäyskokeessa Optim 960 QC särmättiin painimilla R4 ja R8. Lopulliset laserkäsittelyparametrit olivat; teho 3,5 kW, nopeus 4 mm/s, 16 mm:n amplitudi, 2 Hz:n taajuus. Taulukossa 13 on esitetty 4 mm paksun Optim 960 QC:n lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 13. 4 mm paksun Optim 960 QC:n lopulliset taivutukset*

OPTIM 960 QC 4 mm	Minimitaivutussäde (mm)	Toteutunut taivutussäde (mm)	Takaisin- jousto (°)	R/t	Maksimi taivutus- voima (kN)
Perusmateriaali	12	9	11	3,5	210
Lämpökäsitelty	4	4,1	7,5	1	135
Lämpökäsitelty	1			0,25	

Visuaalisen tarkastelun perusteella Optim 960 QC:n taivutussuunnalla ei ollut merkitystä särmättävyyteen (11, s. 20). Tulosten paraneminen on merkittävä, koska Ruukin määrittämä pienin sallittu taivutussäde 4 mm:n paksuiselle Optim 960 QC:lle toimitustilassa on 16 mm. Optim 960 QC voidaan särmätä vikaantumatta lämpökäsiteltynä jopa 1 mm:n säteisellä ylätökalulla ja levy voidaan myös testien mukaan litistää. Lämpökäsitellyn levyn 4 mm:n minimitaivutussäde on noin 67 % pienempi perusmateriaalin 12 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna.

#### **4.2 Optim 1100 QC 4 mm**

Optim 1100 QC:n laserlämpökäsittelyparametreiksi valittiin alustavissa särmäyksissä Ajo1; teho 3,5 kW, nopeus 3,9 mm/s, 16 mm:n amplitudi ja 2 Hz:n taajuus. Tulosten mukaan perusaine alkaa vikaantua kun taivutussäde lähenee 10 millimetriä. Koemateriaali voidaan särmätä lähes virheettömästi laserlämpökäsittelyn avulla 4 mm:n ylätökalulla (11, s. 17). Taulukossa 14 on esitetty 4 mm paksun Optim 1100 QC:n alustavat taivutusarvot.

TAULUKKO 14. 4 mm paksun Optim 1100 QC:n alustavat taivutukset

Materiaali/käsittely	Parametrit	Pinnanlaatu	R/t
Perusaine	W45/R14/90°	Lievä reunasärö Lievä geometri- nen virhe	3,5
Perusaine	W45/R8/90°	Reunasärö Geometrisen vir- he Hyvin ohut pin- tasärö Ohut pintasärö Lievä pintahalkei- lu	2
Ajo1	W45/R4/90°	Hyvin ohut pin- tasärö	1
Ajo1	W45/R1/90°	Hyvin ohut pin- tasärö Ohut pintasärö	1/4

Lopullisessa särmäyskokeessa Optim 1 100 QC särmättiin painimilla R8 ja R10. Laserkäsittelyparametrit olivat; teho 3,5 kW, nopeus 3,9 mm/s, 16 mm:n amplitudi ja 2 Hz:n taajuus. Taulukossa 15 on esitetty 4 mm paksun Optim 1100 QC:n lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 15. 4 mm paksun Optim 1100 QC:n lopulliset taivutukset*

OPTIM 1100 QC 4 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutunut taivu- tussäde (mm)	Takaisin kaisin- jousto (°)	R/t	Maksimi taivutus- voima (kN)
Perusmateri- aali	12	8	12	4	200
Lämpökäsitel- ty	8	9	9,5	2	165

Visuaalisen tarkastelun perusteella Optim 1100 QC:n muovattavuus laserkäsitelyn jälkeen on parempi poikittain valssaussuuntaan nähden. Vaurioita ilmeni vain pitkittäiseen suuntaan tehdyissä taifeissa (11, s. 20). Ruukin määrittämä pienin sallittu taivutussäde 4 mm paksulle Optim 1100 QC:lle toimitustilassa on 16 mm. Perusmateriaali voidaan särmätä 12 mm:n säteellä ja laserkäsitelty levy 8 mm:n säteellä ilman suurempia vaurioita. Lämpökäsitellyn levyn 8 mm:n minimitaivutussäde on noin 34 % pienempi perusmateriaalin 12 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna.

### **4.3 Optim 960 QC 6 mm**

Optim 960 QC:n alustavien särmäysten laserlämpökäsittelyparametrit olivat seuraavat:

- teho 4 kW, nopeus 3 mm/s, vaaputusamplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, nopeus 3,1 mm/s, vaaputusamplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz.

Alustavissa särmäyksissä käytetyt testikappaleet olivat kooltaan 300 mm x 300 mm. Lopullisissa särmäyksissä käytettiin noin kolme kertaa suurempia levyjä (15, s. 16). Taulukossa 16 on esitetty 6 mm paksun Optim 960 QC:n alustavat taivutusarvot.

*TAULUKKO 16. 6 mm paksun Optim 960 QC:n alustavat taivutukset*

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	Takaisinjousto	R/t
V3A16F2 Pitkittäin	W45/R4/90°	Hyvin ohut pintasärö		0,33
V3,1A16F2 Pitkittäin	W45/R4/90°	Hyvin ohut pintasärö		0,33

Lopulliset laserkäsittelyparametrit 6 mm paksulle Optim 960 QC:lle olivat; teho 4 kW, nopeus 3,1 mm/s, 16 mm:n amplitudi ja 2 Hz:n taajuus. Lopulliset särmäykset suoritettiin käyttämällä R6 ja R8 painimia. Vastimen leveys oli 75 mm ja särmäykset suoritettiin pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden (15, s. 17). Taulukossa 17 on esitetty 6 mm paksun Optim 960 QC:n lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 17. 6mm paksun Optim 960 QC:n lopulliset taivutukset*

OPTIM 960 QC 6 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutu- nut taivu- tussäde (mm)	Takaisin- jousto (°)	R/t	Levyn ohenema- taipeessa (mm)	Maksimi taivutus- voima (kN)
Perusma- teriaali	18	19	10	3	0,1	250
Lämpö- käsitelty	6	6,5	7,4	1	0,3	190



Visuaalisen tarkastelun perusteella Optim 960 QC voidaan särmätä yhtä hyvin sekä pitkittäin että poikittain valssaussuuntaan nähden (15, s. 20). Optim 960 QC voidaan särmätä lämpökäsiteltynä 6 mm:n vahvuksena 6 mm:n ylätökalulla ilman vikaantumista. Lämpökäsitellyn levyn 6 mm:n minimitaivutussäde on noin 67 % pienempi perusmateriaalin 18 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna. Ruukin määrittämä pienin sallittu taivutussäde perusmateriaalille on 22 mm. Laserlämpökäsitellyn levyn taivutusvoima oli 24 % pienempi ja takaisinjousto 26 % pienempi perusmateriaaliin verrattuna.

#### 4.4 Optim 1100 QC 6 mm

Optim 1100 QC:n parametrijako oli suppea. Lämpökäsittelyn avulla materiaalista kuitenkin muodostui kovuudeltaan laserkäsitellyn Optim 960 QC:n kovuinen. Laserkäsitelyparametreiksi valikoitui; teho 4 kW, nopeus 3 mm/s, amplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz. (15, s. 9.)

Optim 1100 QC:n lopulliset särmäykset tehtiin R6 ja R8 painimilla. Vastimen leveys oli 75 mm. Särmäykset tehtiin sekä pitkittäin että poikittain valssaussuuntaan nähden (15, s. 17). Taulukossa 18 on esitetty 6 mm paksun Optim 1100 QC:n lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 18. 6 mm paksun Optim 1100 QC:n lopulliset taivutukset*

OPTIM 1100 QC 6 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutu- nut taivu- tussäde (mm)	Takaisin kaisin- jousto (°)	R/t	Levyn ohenema taipeessa (mm)	Maksimi tai- vutusvoima (kN)
Perusma- teriaali	24	23,2	12,4	4	0,1	385
Lämpö- käsitelty	6	6,7	7,8	1	0,1	200

Visuaalisen tarkastelun perusteella Optim 1100 QC:n särmättävyys on yhtä hyvä pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden (15, s. 20). Ruukin määrittämä pienin sallittu taivutussäde perusmateriaalille toimitustilassa on 25 mm. 6 mm paksu Optim 1100 QC pystytään särmäämään vikaantumatta lämpökäsittelyä 6 mm:n ylätökalulla. Lämpökäsittelynä levyn taivutusvoima pieneni 48 % ja takaisinjousto pieneni 37 %. Lämpökäsittelyn levyn 6 mm:n minimitaivutussäde on noin 75 % pienempi perusmateriaalin 24 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna.

#### **4.5 Miilux 500 6 mm**

Alustavissa särmäyskokeissa Miilux 500:lle käytettiin useita laserajonopeuksia:

- teho 4 kW, 2,6 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 2,7 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 2,8 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 2,9 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,0 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,1 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,2 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz.

Alustavissa särmäyksissä käytetyt testikappaleet olivat kooltaan 300 mm x 300 mm. Lopullisissa särmäyksissä käytettiin noin kolme kertaa suurempia levyjä (15, s. 16). Taulukossa 19 on esitetty 6 mm paksun Miilux 500 -teräksen alustavat taivutusarvot.

TAULUKKO 19. 6 mm paksun Miilux 500:n alustavat taivutukset

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	Takaisin-jousto	R/t
V2,6A16F2	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
Pitkittäin	W75/R15/90°	OK		2,5
V2,7A16F2	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
Pitkittäin	W75/R15/90°	OK		2,5
V2,8A16F2	W75/R15/90°	OK		2,5
V2,9A16F2	W75/R15/90°	OK		2,5
V3,0A16F2	W75/R15/90°	OK		2,5
V3,1A16F2	W75/R15/90°	OK		2,5
V3,2A16F2	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
Pitkittäin	W75/R15/90°	OK		2,5

Lopullisiksi laserkäsittelyparametreiksi valittiin seuraavat arvot; teho 4 kW, nopeus 2,7 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz. Särmäyksessä käytettiin R10, R12, R14 ja R16 painimia. Vastimen leveys oli 75 mm ja särmäykset tehtiin

valssaussuuntaan nähden pitkittäin ja poikittain (15, s. 17). Taulukossa 20 on esitetty 6 mm paksun Miilux 500 -teräksen lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 20. 6 mm paksun Miilux 500:n lopulliset taivutukset*

MIILUX 500 6 mm	Minimitaivutussäde (mm)	Toteutunut taivutussäde (mm)	Takaisinjousto (°)	R/t	Levyn ohenema taiveessa (mm)	Maksimi taivutusvoima (kN)
Perusmateriaali	20	20	16	3,33	0,1	497
Lämpökäsittely	10 (POIKITTAIN)	10,9	12,2	1,67	0,1	340
Lämpökäsittely	12 (B-TAIVUTUS)	13	12,2	2		345

Visuaalisen tarkastelun perusteella Miilux 500 särmäytyy paremmin poikittain valssaussuuntaan nähden. Miilux-teräksen pienin sallittu taivutussäde toimitustilassa on 60 mm. 6 mm paksu Miilux 500 voidaan särmätä vaurioitumatta pitkittäin ja poikittain R12-painimella ja B-taivutuksella. B-taivutuksessa venyvä pinta on laserkäsittelyn aikainen yläpinta (15, s. 20). Poikittaisissa särmäyksissä taivutus voidaan tehdä R10-painimella.

6 mm paksujen terästen särmäyskokeissa Miilux 500 oli ainoa, jonka särmäysherkkyyteen vaikutti teräksen A- ja B-puoli (15, s. 20). Miilux 500:n taivutusvoima pieneni lämpökäsittelyn seurauksena 32 % ja takaisinjousto pieneni 24 %. Lämpökäsittellyn levyn 10 mm:n minimitaivutussäde on noin 50 % pienempi perusmateriaalin 20 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna.

#### 4.6 Raex 500 6 mm

Alustavissa särmäyskokeissa Raex 500:lle käytettiin useita laserajonopeuksia:

- teho 4 kW, 2,7 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 2,8 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 2,9 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,0 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,1 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,2 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,4 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz
- teho 4 kW, 3,7 mm/s, 16 mm:n amplitudi, taajuus 2 Hz.

Alustavissa särmäyksissä käytetyt testikappaleet olivat kooltaan 300 mm x 300 mm. Lopullisissa särmäyksissä käytettiin noin kolme kertaa suurempia levyjä (15, s. 16). Taulukossa 21 on esitetty 6 mm paksun Raex 500 -teräksen alustavat taivutusarvot.

TAULUKKO 21. 6 mm paksun Raex 500:n alustavat taivutukset

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	Takaisinjousto	R/t
V2,7A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
V2,8A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
V2,9A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	OK		1,67
V3,0A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	Hyvin ohut pintasärö		1,67
V3,4A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	OK		1,67
V3,7A16F2 Pitkittäin	W75/R10/90°	OK		1,67

Lopulliset laserkäsittelyparametrit Raex 500 -teräkselle olivat seuraavat; teho 4 kW, nopeus 3 mm/s, amplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz. Raex 500 särmättiin R8-, R12-, R14- ja R16-painimilla. Alatyökalun leveys oli 75 mm ja särmäykset tehtiin pitkittäin ja poikittain valssausuuntaan nähden (15, s. 17). Taulukossa 22 on esitetty 6 mm paksun Raex 500 -teräksen lopulliset taivutusarvot.

TAULUKKO 22. 6 mm paksun Raex 500:n lopulliset taivutukset

RAEX 500 6 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutunut taivutussäde (mm)	Ta- kaisin- jousto (°)	R/t	Levyn ohenema taipeessa (mm)	Maksimi taivutusvoi- ma (kN)
Perusma- teriaali	25	25	17	4,16	0,1	530
Lämpökä- sitelty	8 (POI- KITTAIN)	9	8,9	1,33	0,1	210

Visuaalisen tarkastelun perusteella Raex 500 särmäytyy paremmin poikittain valssaussuuntaan nähden. Teräs särmäytyi ilman vaurioita poikittaisissa särmäyksissä R8-painimella (15, s. 20). Raex 500:n maksimitaivutusvoima pieneni lämpökäsittelyn seurauksena 60 % ja takaisinjousto pieneni 48 %. Ruukin määrittämä suurin sallittu taivutussäde 6 mm paksulle perusmateriaalille toimitustilassa on 36 mm. Lämpökäsitellyn levyn 8 mm:n minimitaivutussäde on noin 68 % pienempi perusmateriaalin 25 mm:n minimitaivutussäteeseen verrattuna.

#### 4.7 Miilux 500 10 mm

Miilux 500 10 mm alustavissa särmäyskokeissa käytettiin useita erilaisia laserajoparametreja ja teräs käsiteltiin sekä yhdeltä (austenointi) että molemmilta puolilta (päästö). Parhaimmiksi parametreiksi osoittautuivat seuraavat arvot:

- 1 puoli; teho 4 kW, nopeus 1,7 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz
- 2 puolta; teho 4 kW, nopeus 10 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz.

Alustavissa särmäyskokeissa materiaalin mitat eivät olleet samat kuin lopullisissa särmäyskokeissa. Lopullisissa särmäyksissä levyjen mitat olivat 300 mm x 200 mm (16, s. 8). Taulukoissa 23 ja 24 on esitetty 10 mm paksun Miilux 500 -teräksen alustavat taivutusarvot.

*TAULUKKO 23. 10 mm paksun Miilux 500:n alustavat taivutukset, käsitelty yhdeltä puolelta*

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	R/t
V1,7A16F2 (Pitkittäin)	W100/R18/90°/A	Hyvin ohut pintasärö	1,8

*TAULUKKO 24. 10 mm paksun Miilux 500:n alustavat taivutukset, käsitelty kummaltakin puolelta*

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	R/t
V10A16F2 (Pitkittäin)	W100/R16/90°	OK	1,6

Lopullisiksi lämpökäsittelyparametreiksi 10 mm paksulle Miilux 500:lle valittiin seuraavat arvot:

- teho 4 kW, nopeus 1,7 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (austenointi)
- teho 4 kW, nopeus 10 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö)
- teho 4 kW, nopeus 12 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö)
- teho 4 kW, nopeus 14 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö).

Austenointi toteutettiin käsittelemällä levystä yksi puoli ja päästetyt levyt käsiteltiin molemmilta puolilta. Päästettyjen levyjen särmäyspuolella ei ole merkitystä. Lopulliset särmäykset tehtiin painimilla R16, R18, R20, R22 ja R24. Levyjen reunat hiottiin taiveen kohdalta, jotta leikkausreuna ei vaikuta särmättävyyteen. Särmäykset tehtiin pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden. Austenoidut levyt särmättiin siten, että venyvänä pintana oli laserkäsittelyn aikainen yläpinta. Vastimen leveys oli 100 mm kaikissa särmäyksissä. Lisäksi perusmateriaali särmättiin R30- ja R50-painimilla 140 mm leveään vastimeen (16, s. 10). Taulukossa 25 on esitetty 10 mm paksun Miilux 500 -teräksen lopulliset taivutusarvot.



TAULUKKO 25. 10 mm paksun Miilux 500:n lopulliset taivutukset

MIILUX 500 10 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutunut taivutussäde (mm)	Ta- kaisin- jousto (°)	R/t	Levyn ohenema- taipeessa (mm)	Maksimi taivutus- voima (kN)
Perusma- teriaali	30	31,3	20,8	3	0,15	610
Lämpökä- sitelty	16 (POI- KITTAIN)	13,3	15	1,6	0,3	640

Visuaalisen tarkastelun perusteella Miilux 500 voidaan särmätä paremmin poikittain valssaussuuntaan nähden (16, s. 13). 10 mm paksu Miilux 500 pystytään särmäämään vikaantumatta toimitustilassa 30 mm:n ylätökalulla. 10 mm paksun Miilux 500 -teräksen suurin sallittu taivutussäde valmistajan mukaan on 100 mm. Lämpökäsittelynä teräs voidaan särmätä ilman suurempia vaurioita 16 mm:n ylätökalulla. Lämpökäsittelyarvoina on tässä tapauksessa; teho 4 kW, nopeus 10 mm/s, amplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz (päästö). Lämpökäsittelyn avulla särmäyskulma pieneni noin 47 %. Taivutusvoima oli samaa luokkaa perusaineella ja laserkäsitellyllä levyllä.

#### 4.8 Raex 500 10 mm

Raex 500:n alustavissa särmäyksissä teräs käsiteltiin austenoimalla sekä päästämällä. Raex 500:n alustavat laserkäsittelyparametrit olivat seuraavat:

- 1 puoli; teho 4 kW, nopeus 1,7 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz
- 2 puolta; teho 4 kW, nopeus 10 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz.

Alustavissa särmäyskokeissa materiaalin mitat eivät olleet samat kuin lopullisissa särmäyskokeissa. Lopullisissa särmäyksissä levyjen mitat olivat 300 mm x 200 mm (16, s. 8). Taulukoissa 26 ja 27 on esitetty 10 mm paksun Raex 500 -teräksen alustavat taivutusarvot.

TAULUKKO 26. 10 mm paksun Raex 500:n alustavat taivutukset, käsitelty yhdeltä puolelta

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	R/t
V1,7A16F2 (Pitkittäin)	W100/R12/90°/B	OK	1,2
	W100/R15/90°/B	OK	1,5
	W100/R18/90°/A	OK	1,8

TAULUKKO 27. 10 mm paksun Raex 500:n alustavat taivutukset, käsitelty molemmilta puolilta

Käsittely/taivutussuunta	Parametrit	Pinnanlaatu	R/t
V10A16F2 (Pitkittäin)	W100/R12/90°	Hyvin ohut pintasärö	1,2
	W100/R16/90°		1,6

Lopullisiksi lämpökäsittelyparametreiksi 10 mm:n Raex 500:lle valittiin seuraavat arvot:

- teho 4 kW, nopeus 1,7 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (austenointi)
- teho 4 kW, nopeus 10 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö)
- teho 4 kW, nopeus 12 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö)
- teho 4 kW, nopeus 14 mm/s, amplitudi 16 mm, taajuus 2 Hz (päästö).

Austenointi toteutettiin käsittelemällä levystä yksi puoli ja päästetyt levyt käsiteltiin molemmilta puolilta. Päästettyjen levyjen särmäyspuolella ei ole merkitystä. Lopulliset särmäykset tehtiin painimilla R14, R16 ja R18. Levyjen reunat hiottiin taiteen kohdalta, jotta leikkausreuna ei vaikuta särmättävyyteen. Särmäykset tehtiin pitkittäin ja poikittain valssausuuntaan nähden. Austenoidut levyt sär-

mättiin siten, että venyvänä pintana oli laserkäsittelyn aikainen yläpinta. Vastimen leveys oli 100 mm kaikissa särmäyksissä. Lisäksi perusmateriaali särmättiin R30 ja R50 painimilla 140 mm leveään vastimeen (16, s. 10). Taulukossa 28 on esitetty 10 mm paksun Raex 500 -teräksen lopulliset taivutusarvot.

*TAULUKKO 28. 10 mm paksun Raex 500:n lopulliset taivutukset*

RAEX 500 10 mm	Minimi- taivutus- säde (mm)	Toteutunut taivutussäde (mm)	Ta- kaisin- jousto (°)	R/t	Levyn ohenema tai- peessa (mm)	Maksimi taivutusvoi- ma (kN)
Perusma- teriaali	30	30	20,3	3	0,17	560
Lämpökä- sitelty	16 (POI- KITTAIN)	11,2	13,5	1,6	0,35	565

Visuaalisen tarkastelun perusteella Raex 500 voidaan särmätä paremmin poikittain valssaussuuntaan nähden (16, s. 13). 10 mm:n vahvuinen Raex 500 pystytään särmäämään vikaantumatta toimitustilassa 30 mm:n ylätyökalulla. 10 mm paksun Raex 500:n suurin sallittu taivutussäde valmistajan mukaan on 50 mm. Lämpökäsiteltynä teräs voidaan särmätä ilman vaurioita 16 mm:n ylätyökalulla poikittain valssaussuuntaan nähden. Lämpökäsittelyarvoina on tässä tapauksessa; teho 4 kW, nopeus 12 mm/s, amplitudi 16 mm ja taajuus 2 Hz (päästö). Lämpökäsittelyn avulla särmäyskulma pieneni noin 47 %. Taivutusvoima oli samaa luokkaa perusaineella ja laserkäsitellyllä levyllä.

## **5 TERÄKSEN PAIKALLISEN LÄMPÖKÄSITTELYN EDUT, HAITAT JA KUSTANNUSTEHOKKUUS**

Lämpökäsittelyiden avulla voidaan vaikuttaa positiivisesti terästen särmättävyyteen. Pienemmät taivutuskulmat mahdollistavat terästen monipuolisemman jatkojalostuksen ja näin ollen uusien sovellusten toteuttamisen. Nopealla paikallisella lämpökäsittelyllä voidaan säästää energiakustannuksissa. Muutokset muokkausominaisuuksissa saadaan kohdistettua juuri tietyille halutulle alueelle.

### **5.1 Taipeen kovuus**

Teräksen lämpökäsittelyllä on myös haittapuolensa. Laserkäsittelyn seurauksena teräksen mekaaniset ominaisuudet alenevat muovattavuuden kustannuksella. Jos muu rakenne on kovempaa kuin lämpökäsitelty alue, lämpökäsitelty alue altistuu vaurioille. Teräkselle on ominaista muokkauslujittua muovauksen aikana. Lämpökäsittely parantaa huomattavasti teräksen muokkauslujittuvuutta ja tämä kompensoi teräksen alentuneita lujuusominaisuuksia. Lämpökäsitelty alue lujittuu voimakkaasti muovatessa.

Kantavissa rakenteissa särmätyn rakenneteräksen tärkein ominaisuus on särmätyn taipeen lujuus. Yleensä taipeen kovuus ja lujuus jäävät joitain prosenttiyksiköitä pienemmäksi kuin perusmateriaali. On myös tapauksia, jolloin teräs muokkauslujittuu paikoitellen perusaineen tasolle. Dynaamisessa eli iskumaisessa kuormituksessa taipeen sisäpinta on kaikkein kriittisin vaurioiden kannalta. Vetosuuntaisen jäännösjännityksen ja taipeessa vallitsevan jännitysjauman tuloksena särön ydintyminen pyrkii tapahtumaan sisätaipeessa. (10, s. 32.)

Jos taipeen sisäpinta jää muovattaessa heikommaksi kuin perusaine, se on merkittävä heikkous dynaamisesti kuormitetussa rakenteessa. Kulutusteräksillä pääpaino mekaanisten ominaisuuksien muutoksissa on nimenomaan teräksen kulutus- ja iskunkestävyydessä. Lämpökäsittely alentaa teräksen kovuutta ja kovuuden aleneminen pyritään kompensoimaan muokkauslujittumisella.

Terästen lämpökäsittely mahdollistaa pienien taivutussäteiden käytön teräksiä särmätessä. Se ei ole kuitenkaan tae onnistuneeseen lopputulokseen, jos ajatellaan kuormitettuja, monimutkaisia ja korkeaa kulutuksen kestoa vaativia rakenteita. Terästä muovatessa on otettava huomioon teräksen alentuneet lujuus- ja kovuusominaisuudet lämpökäsittelyn seurauksena ja se, miten teräs lujittuu muovatessa. On huomioitava, saavutetaanko muokkauslujittumisen avulla riittävät lujuus- ja kovuusominaisuudet perusmateriaaliin verrattuna. Jos taive ei saavuta haluttua kovuutta muokkauslujittumisen seurauksena, on mahdollista suorittaa jälkikarkaisu. Jälkikarkaisulla taipeen kovuutta saadaan kasvatettua.

## **5.2 Paikallisen lämpökäsittelyn hyötysuhde ja kustannukset**

Laserlämpökäsittely on tarkka mutta induktioon verrattuna hidas lämpökäsittelymenetelmä. Levy voidaan lämmittää nopeasti, mutta tasainen lämpötilajakauma on erittäin haastavaa saavuttaa. Laserilla saavutettu hyötysuhde on noin 20 %. Laserkäsittely sopii parhaiten ohuille, maksimissaan 10 mm:n paksuisille levyille. Laserkäsittely on suhteellisen kallista. 4 kW:n laser maksaa noin 160 000 €. Karkeasti laskettuna laserin kilowattihinta on noin 40 000 €.

Induktiokuumennus on lämmitysmenetelmänä huomattavasti nopeampi ja tehokkaampi menetelmä. Induktiokuumennus sopii hyvin ohuille ja paksuille levyille. Induktion hyötysuhde on jopa 80 - 90 %, koska lämmitys tapahtuu teräksen sisällä. Induktion karkeasti laskettu kilowattihinta on noin 1 000 €. Se on huomattavasti edullisempi verrattuna laseriin.

Tuotannollisesti induktiokuumennus on lähes kaikilta osa-alueiltaan suotuisampi menetelmä jos tarkastellaan terästen särmättävyyttä. Laserin etuja sen sijaan ovat sen monipuolisuus ja tarkkuus, kuten leikkausominaisuudet ja tarkat pintakäsittelyt. Menetelmänä laserlämpökäsittely on kallis tuotannollisesta näkökulmasta katsottuna. On myös varmasti olemassa esimerkiksi ohutlevyprosesseja, joissa laser osoittautuu induktiota paremmaksi menetelmäksi ja maksaa itsensä takaisin.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä käytiin läpi Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tekemiä tutkimuksia ja tutkimusraportteja. Opinnäytetyössä tutkittiin kulutusterästen ja ultralujien rakenneterästen lämpökäsittelyä, särmäystä ja lämpökäsittelymenetelmien toimivuutta. Lujat kulutus- ja rakenneteräket ovat hyvin muovattavissa paikallisten lämpökäsittelyiden avulla. Teräksiä särmätessä tulee ottaa huomioon, ettei taippeen kohdalla ole vaurioita aiheuttavia railoja ja leikkausreuna on siisti. Teräksiä voidaan särmätä myös vaiheittain eli inkrementaalisesti vastoin valmistajien suosituksia. Valmistajat suosittelevat käyttämään terästen särmäyksessä kertapainallusta.

Jos terästä särmätään vaiheittain, paras tulos saavutetaan käyttämällä joustavaa rullamuovausta. Joustavalla rullamuovauksella testimateriaalit voidaan särmätä pienemmällä sisätaippeen säteellä kuin inkrementaalisella särmäyksellä. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän mukaan joustavalla rullamuovauksella saadaan aikaan CP960-teräksellä 38 % pienempi sisätaippeen säde ja CP1100-teräksellä 58 % pienempi sisätaippeen säde kuin inkrementaalisella särmäyksellä. Teräksen muovauksen kannalta joustavan rullamuovauksen ja paikallisen lämpökäsittelyn yhdistäminen voisi olla tehokas yhdistelmä.

Terästen lämpökäsittelyt voidaan suorittaa erilaisia paikallisia lämpökäsittelyitä käyttäen. Laseria on käytetty esimerkiksi autoteollisuudessa jo pitkään ja tehon ja energiatehokkuuden kasvu on mahdollistanut sen laajemman soveltamisen. Toinen erinomainen menetelmä on induktio, jolla on erittäin hyvä hyötysuhde. Menetelmä on nopea ja päästötön.

Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmän tekemät laserlämpökäsittelyt ja särmäyskokeet ultralujille rakenne- ja kulutusteräksille osoittavat, että paikalliset lämpökäsittelyt sopivat erinomaisesti erikoisterästen muovattavuuden parantamiseen. Tutkimukset olivat erittäin perusteellisia ja insinööriopiskelijan näkökulmasta jokseenkin haastavia, mutta tarvittavat tiedot omaan työhöni löytyivät tiukan rajaamisen avulla. Kerätyistä taivutusarvoista näkee selvästi, kuinka suu-

ria parannuksia FMT-tutkimusryhmä on saanut aikaan terästen muovattavuusominaisuuksien osalta. Taulukossa 29 on esitetty särmätyt teräket ja saavutetut särmäyskulmat perusaineilla ja laserlämpökäsitellyillä levyillä.

*TAULUKKO 29. Terästen pienimmät taivutussäteet perusaineella ja lämpökäsiteltynä*

Teräs ja vahvuus	Minimi taivutussäde (perusaine)	Minimi taivutussäde (lämpökäsitelty)	Taivutussäteen muutos
Optim 960 QC 4 mm	12 mm	4 mm	–67 %
Optim 1100 QC 4 mm	12 mm	8 mm	–34 %
Optim 960 QC 6 mm	18 mm	6 mm	–67 %
Optim 1100 QC 6 mm	24 mm	6 mm	–75 %
Miilux 500 6 mm	20 mm	10 mm	–50 %
Raex 500 6 mm	25 mm	8 mm	–68 %
Miilux 500 10 mm	30 mm	16 mm	–47 %
Raex 500 10 mm	30 mm	16 mm	–47 %

Lämpökäsittelyn avulla teräksen muovattavuuteen pystytään vaikuttamaan positiivisesti, mutta on tärkeää ottaa huomioon myös teräksessä tapahtuvat ominaisuusmuutokset. Lämpökäsittely heikentää teräksen ominaisuuksia, mutta sitä kompensoidaan muokkauslujittumisella. Dynaamisesti kuormitetuilla rakennete-

räksillä tärkein ominaisuus on sisätaipeen kovuus. Iskevä kuormitus kohdistuu nimenomaan särmätyn teräksen sisätaipeeseen. Kulutusteräksiltä vaaditaan isku- ja kulutuskestävyyttä. Jos taipeet eivät saavuta riittäviä kovuusarvoja muokkauslujittumisen seurauksena, voidaan käyttää jälkikarkaisua.

Induktiokuumennus ja laserlämpökäsittely ovat molemmat omalta osaltaan hyviä menetelmiä paikallisiin lämpökäsittelyihin. Tuotannollisesta näkökulmasta induktiokuumennus on kuitenkin huomattavasti edullisempi ja hyötysuhteeltaan parempi menetelmä. Laserin hyötysuhde on noin 20 %, ja karkeasti laskettuna laserin kilowattihinta on noin 40 000 €. Induktion hyötysuhde on noin 80 - 90 %, ja induktiokilowatti maksaa noin 1 000 €. On kuitenkin varmasti olemassa esimerkiksi ohutlevyprosesseja, joissa laser on kannattavampi ja maksaa itsensä takaisin.



## LÄHTEET

1. Lämsä, Janne – Kiuru, Henri 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräksset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. CASR-Steelpolis –verkostohanke. Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy. Oulun yliopisto. Saatavissa: <https://wiki.oulu.fi/download/attachments/28082956/Ultralujat+rakenne-+ja+kulutuster%C3%A4kset+-+t%C3%A4rkeimm%C3%A4t+ominaisuudet+suunnittelulle.pdf>. Hakupäivä 6.10.2014.
2. Oulun yliopiston konetekniikan osasto. Diplomityö. Kiuru, Toni 2014. Ultralujan teräksen paikallisen laserlämpökäsittelyn FE -mallinnus. Saatavissa: <http://herkules.oulu.fi/thesis/nbnfioulu-201405011331.pdf>. Hakupäivä 6.10.2014.
3. Oulun yliopiston konetekniikan osasto. Diplomityö. Kiuru, Henri 2012. Ultralujien terästen käyttö dynaamisesti kuormitetuissa koneen rakenteissa.
4. Väisänen, Päivi 2007. Teräs. TKK Arkkitehtiosasto. Rakennusoppi 2007. Vammalan kirjapaino Oy. Saatavissa: [http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras\\_web.pdf](http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras_web.pdf). Hakupäivä 13.10.2014.
5. Määttä, Antti – Järvenpää, Antti – Jaskari, Matias – Mäntyjärvi, Kari - Karjalainen, Jussi 2012. Influence on Predetermined Surface Defect to the Bendability of Ultra-High-Strength Steel. Oulun yliopisto, Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
6. Kantola, Jani – Mäntyjärvi, Kari – Karjalainen, Jussi 2012. Laser Assisted Cutting of Abrasion Resistant Steel. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
7. Määttä, Antti – Mäntyjärvi, Kari – Karjalainen Jussi 2011. Incremental Bending of Ultra-High-Strength Steels. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.

8. Järvenpää, Antti 2012. Teräksen ominaisuuksien räätälöinti. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä. Saatavissa: <https://wiki.oulu.fi/download/attachments/28082345/Ultralujien+ter%C3%A4sten+r%C3%A4t%C3%A4l%C3%B6idyt+ominaisuudet+-+Antti+J%C3%A4rvenp%C3%A4%C3%A4.pdf>. Hakupäivä 3.3.2015.
9. Järvenpää, Antti – Karjalainen, Pentti – Mäntyjärvi, Kari 2011. Passive laser assisted bending of ultra-high strength steels. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
10. Järvenpää, Antti 2012. Loppuraportti. ULLA – Ultralujien materiaalien paikalliset laserlämpökäsittelyt. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
11. Järvenpää, Antti – Määttä, Antti – Mäntyjärvi, Kari 2010. Ultralujien levy materiaalien paikalliset laserkäsittelyt – ULLA raportti.1. koesarja. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
12. Vähäkainu, Olli 2012. Ruukin kuumavalssatut erikoisteräksset. Oulun yliopisto. Seminaariesitys. Saatavissa: <https://wiki.oulu.fi/download/attachments/28082345/Ruukin+kuumavalssatut+erikoister%C3%A4kset+-+Olli+V%C3%A4h%C3%A4kainu.pdf>. Hakupäivä 25.3.2015.
13. Ruukki Oy 2014. Särämäys, Raex-kulutusteräksset, ultralujat Optim QC -teräksset. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20kasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.ashx>. Hakupäivä 25.3.2015.
14. Miilux Oy 2014. Miilux – Tekniset tiedot. Saatavissa: [http://www.miilux.fi/wp-content/uploads/2013/01/miilux\\_tekniset\\_tiedot\\_2014\\_A4.pdf](http://www.miilux.fi/wp-content/uploads/2013/01/miilux_tekniset_tiedot_2014_A4.pdf). Hakupäivä 25.3.2015.

15. Järvenpää, Antti – Määttä, Antti – Mäntyjärvi Kari 2010. Ultralujien levymateriaalien paikalliset laserkäsittelyt – ULLA raportti. 2. koesarja. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.
16. Järvenpää, Antti – Määttä, Antti – Mäntyjärvi Kari 2010. Ultralujien levymateriaalien paikalliset laserkäsittelyt – ULLA raportti. 3. koesarja. Oulun yliopisto. Oulun Eteläisen instituutin FMT-tutkimusryhmä.